

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**Máster en Ingeniería Química**

**ANÁLISIS HISTÓRICO DE DISPERSIÓN DE FUGAS TÓXICAS:  
EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS DE ALERTA E  
INTERVENCIÓN**



**Memoria y Anexos**

<b>Autor:</b>	Jesús Martín García
<b>Director:</b>	Elsa Pastor Ferrer
<b>Departamento:</b>	Ingeniería Química
<b>Convocatoria:</b>	Junio 2018



## Resum

Des del començament de la indústria dels processos químics hi ha hagut una gran quantitat d'incidents que han causat una pèrdua significativa de vides i danys a la propietat. El present projecte està focalitzat en l'avaluació d'accidents que involucren fuites tòxiques. En primer lloc, es realitza una anàlisi històrica d'abast mundial de 525 accidents diferents en què participen emissions tòxiques. Les principals característiques han sigut analitzades: data de l'incident, densitat de població, ubicació de l'accident, origen (general i específic), causes, quantitat de substància, dany i nombre de persones afectades (morts, ferits i evacuats). Es pot observar que la majoria d'accidents tenen lloc en àrees molt poblades (84%) i les causes més freqüents són el factor humà (34%) seguit per la fallada mecànica (32%). Les plantes de procés (33%) i el transport (23%) són els llocs en els quals més comunament es produeixen accidents amb emissions tòxiques. Els resultats obtinguts mostren que la quantitat de persones que pateixen lesions és considerablement major a la quantitat d'individus morts. En la segona part d'aquest projecte, el software ALOHA ha sigut escollit per simular l'alliberament de substàncies tòxiques de tres accidents pertanyents a l'anàlisi històric realitzat prèviament. L'últim punt ha sigut simulat per establir distàncies de seguretat que permetin definir zones de seguretat per a les persones. Els tres casos d'estudi han sigut útils per discutir la idoneïtat de la metodologia que mana la llei per determinar zones d'alerta i zones d'intervenció. Els resultats finals mostren que el dany potencial és proporcional a diversos paràmetres, especialment factors meteorològics. Finalment, s'espera que els resultats presentats es puguin utilitzar en les deduccions d'anàlisis de conseqüències i avaluacions de risc, els quals es posarien a disposició del sector amb l'esperança de minimitzar l'impacte potencial d'aquests accidents en el futur.

## Resumen

Desde el comienzo de la industria de los procesos químicos ha habido una gran cantidad de incidentes que han causado una pérdida significativa de vidas y daños a la propiedad. El presente proyecto está centrado en la evaluación de accidentes que involucran fugas tóxicas. En primer lugar, se realiza un análisis histórico de 525 accidentes diferentes en los que participan emisiones tóxicas. Las principales características han sido analizadas: fecha del incidente, densidad de población, ubicación del accidente, origen (general y específico), causas, cantidad de sustancia, daño y número de personas afectadas (muertos, heridos y evacuados). Se observa que la mayoría de los accidentes ocurren en áreas muy pobladas (84%) y las causas más frecuentes son el factor humano (34%) seguido por el fallo mecánico (32%). Las plantas de proceso (33%) y el transporte (23%) son los lugares en los que más comúnmente se producen accidentes con emisiones tóxicas. Los resultados obtenidos muestran que la cantidad de personas que sufren lesiones es considerablemente mayor a la cantidad de individuos fallecidos. En la segunda parte de este proyecto, se ha elegido el software ALOHA para simular la liberación de sustancias tóxicas de tres accidentes pertenecientes al análisis histórico realizado previamente. El último punto ha sido simulado para establecer distancias de seguridad que permitan definir zonas de seguridad para las personas. Los tres casos de estudio han sido útiles para discutir la idoneidad de la metodología que establece la ley para determinar zonas de alerta y zonas de intervención. Los resultados finales muestran que el daño potencial es proporcional a diversos parámetros, especialmente factores meteorológicos. Finalmente, se espera que los resultados presentados se puedan utilizar en las deducciones de análisis de consecuencias y evaluaciones de riesgo, los cuales se pondrían a disposición del sector con la esperanza de minimizar el impacto potencial de dichos incidentes en el futuro.

## Abstract

Since the inception of the chemical process industry, there have been a great number of process incidents causing significant loss of life and property damage. The present project is focused on the assessments of accidents related to toxics release. First of all, a historical analysis of 525 different accidents involving toxic releases has been carried out. The main features have been analysed: date of incident, population density, location of accident, origin (general and specific), causes, quantity of material, damage and number of people affected (killed, injured, evacuated). It is observed that, most of the accidents occur in highly populated areas (84%), the most frequent causes are human factor (34%) followed by mechanical failure (32%). The process plants (33%) and transport (23%) are the most common places where toxic releases accidents have occurred. The results obtained show that the number of injured people is considerably more than the number of people deaths. On the second part of this project, the software ALOHA have been chosen to simulate the release of gaseous toxic substances of three accidents belonging to previous historical analysis. The latter point has been simulated in order to establish safety distances, which enable safety zones to be defined for people. The three case studies have been useful to discuss the suitability of the normative methodology to determine the alert zones and the intervention zones. The final results showed that the damage potential is proportional to various parameters, especially, meteorological factors. Finally, the results can be used in the deductions of relevant analyses of consequences and risk assessments, which would be made available to the sector in hopes of minimizing the potential impact from such incidents in the future.



## Agradecimientos

En primer lugar, dar las gracias a mis padres, por su apoyo incondicional, a lo largo de esta difícil etapa. Ellos son la luz que alumbra mi camino.

Agradecer, por supuesto, la ayuda que me ha brindado mi tutora a lo largo de la elaboración del proyecto, mostrando siempre una disponibilidad absoluta. Y, por último, quiero también mencionar a mis compañeros del CERTEC; gracias por haberme acogido en vuestro lugar de trabajo durante estos últimos meses como si fuese uno más de la familia.







# Índice

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1. Emisiones de sustancias tóxicas .....	4
1.2. Dispersión de fugas tóxicas.....	5
1.3. Objetivos .....	6
<b>2. ANÁLISIS HISTÓRICO</b>	<b>7</b>
2.1. Fuentes de información: bases de datos.....	7
2.2. Metodología de análisis: criterio de selección .....	8
2.3. Resultados del análisis histórico .....	10
2.3.1. Fuente de los registros .....	10
2.3.2. Distribución de los accidentes a lo largo del tiempo .....	11
2.3.3. Densidad de población .....	13
2.3.4. Localización de los accidentes.....	13
2.3.5. Causas .....	14
2.3.6. Origen del accidente.....	17
2.3.7. Sustancias involucradas.....	18
2.3.8. Cantidad de sustancia.....	20
2.3.9. Pérdidas económicas.....	21
2.3.10. Personas afectadas por el accidente.....	22
2.3.11. Aspectos destacables .....	24
<b>3. SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO</b>	<b>25</b>
3.1. Fuga de cloro producida en Baton Rouge, Louisiana (1976) .....	25
3.2. Fuga de cloro en Youngstown, Florida (1978).....	26
3.3. Fuga de cloro cerca de Montana, México (1981).....	27
3.4. Fuga de cloro en La Barre, Louisiana (1961).....	28
3.5. Fuga de amoníaco en Blair, Nebraska (1970).....	28
3.6. Fuga de amoníaco en Potchefstroom, Sudáfrica (1973).....	30
3.7. Fuga de amoníaco en Houston, Texas (1976) .....	31

3.8.	Fuga de amoníaco en Jonava, Lituania (1989) .....	32
3.9.	Fuga de amoníaco en McPherson, Kansas (1973) .....	32
3.10.	Fuga amoníaco en Pensacola, Florida (1977).....	33
3.11.	Fuga de fosgeno en Hamburgo, Alemania (1928) .....	34
3.12.	Fuga de cloro en Mississauga, Toronto (1979) .....	34
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍAS DE ZONIFICACIÓN DE EMERGENCIA .....</b>	<b>37</b>
4.1.	Marco legal .....	37
4.2.	Metodología de protección civil aplicada en España.....	37
4.2.1.	Determinación del alcance de la zona de intervención y zona de alerta .....	42
4.2.2.	Material empleado: ALOHA.....	44
<b>5.</b>	<b>EVALUACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE ZONIFICACIÓN .....</b>	<b>45</b>
5.1.	Aspectos relativos al cloro.....	45
5.1.1.	Evaluación del accidente #4: Fuga de cloro causada por el descarrilamiento de un tren.....	48
5.2.	Aspectos relativos al amoníaco .....	65
5.2.1.	Evaluación del accidente #9: Fuga de amoníaco debido a fallo en una tubería..	67
5.2.2.	Evaluación del accidente #10: Fuga de amoníaco causado por el descarrilamiento de un tren.....	72
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>85</b>
6.1.	Impactos identificados.....	85
6.2.	Caracterización de los impactos.....	85
6.3.	Impacto ambiental.....	86
6.3.1.	Impacto de la existencia del proyecto .....	86
6.3.2.	Impacto del consumo de recursos.....	86
6.3.3.	Impacto de las emisiones.....	87
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>89</b>
<b>PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>		<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>93</b>
<b>ANEXO .....</b>		<b>99</b>
A1.	Campos de interés. Procedimiento seguido en ALOHA.....	99
A2.	Ficha de seguridad del cloro .....	103
A3.	Ficha de seguridad del amoníaco .....	105





## 1. Introducción

En las últimas décadas, una sociedad cada vez más industrializada ha emergido, sobre todo en el ámbito tecnológico, propiciando la aparición de nuevos procesos y de nuevas industrias en este campo y, con ello, de nuevos productos químicos en el mercado. Paralelamente a este avance tecnológico se ha producido, también, un incremento del personal que interviene en diferentes etapas de los procesos productivos. A causa de estos factores, entre otros, la capacidad de producción a nivel industrial se ha visto notablemente incrementada y la manipulación de sustancias peligrosas se ha convertido en algo habitual que implica un riesgo inherente asociado, tanto para la salud de las personas como para el medio ambiente. De hecho, dadas las propiedades de muchas sustancias y las operaciones que se llevan a cabo (carga y descarga, almacenamiento, proceso y transporte), es difícil despreciar la posibilidad de accidentes. Temas relativos a la seguridad industrial han suscitado un interés creciente y han ido cobrando especial importancia (Chen et al. 2015). Esto ha propiciado el desarrollo de disciplinas científicas encargadas de la seguridad de los procesos, centrándose en la prevención y protección ante fuegos, explosiones y fugas accidentales en la industria química (American Institute of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety. 1993). Por otra parte, también han aparecido medidas alternativas que actúan como complementos a las técnicas de identificación de peligros. Una de estas medidas es el análisis histórico de accidentes, comúnmente utilizado para llevar a cabo análisis de riesgo.

Dentro de este contexto, el análisis histórico de accidentes es una herramienta orientada, especialmente, a obtener información de accidentes ocurridos en el pasado. Su aplicación permite identificar la presencia de peligros reales en situaciones similares que han dado lugar a accidentes conocidos y estimar las consecuencias que pueden esperarse (Casal et al. 1999). De hecho, a lo largo de la historia han ocurrido accidentes mundialmente conocidos y calificados de catastróficos por sus consecuencias fatales: el incidente de Flixborough en el Reino Unido (1974), el desastre de Seveso en Italia (1976), la tragedia de Bhopal en la India (1984), Toulouse en Francia (2001), etc. Las consecuencias de todos ellos fueron diversas. Por un lado tuvieron un efecto directo sobre personas, tanto a nivel físico como psicológico, provocando innumerables muertes o lesiones graves, pero, por otro lado, también presentaron efectos sobre el ambiente al producirse el vertido de materiales peligrosos sobre la atmósfera, el suelo o el agua (Casal 2008). Dadas estas circunstancias, lo que permite el análisis histórico de accidentes es identificar puntos débiles del sistema y operaciones mal administradas, además de establecer medidas protectoras para futuros accidentes con características similares y obtener información que, de otra forma, puede ser difícil de evaluar, dando una visión más completa de los sucesos estudiados. Desde el punto de vista de protección civil, también puede ser una herramienta eficaz para elaborar planes de emergencia. La principal limitación que presenta es que únicamente se tiene información de aquellos accidentes que han sido registrados, los cuales, en la

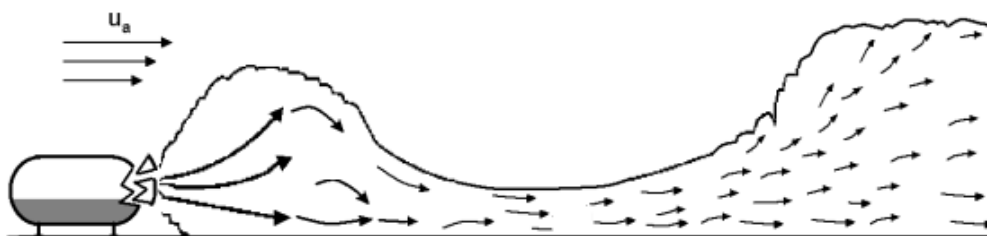
práctica, no necesariamente tienen porqué ser iguales al número de accidentes reales. Además, no siempre la información que se obtiene refleja con fidelidad los sucesos ocurridos, ya que ésta puede ser incompleta o recortada.

Por tanto, la utilización de análisis históricos de accidentes pasados es una metodología ampliamente reconocida como fuente valiosa de información en diversos aspectos (tipo de accidente, sustancias involucradas, consecuencias, etc.), incluso para realizar evaluaciones económicas de accidentes relacionados con la industria química (Carol, Vilchez y Casal 2000), especialmente útiles en la toma de decisiones y la gestión de riesgos. Aun así, el enfoque más habitual de esta técnica es emplearla para analizar accidentes típicos que pueden ocurrir en la industria, como son: incendios, explosiones o fugas tóxicas.

### 1.1. Emisiones de sustancias tóxicas

Los tres riesgos principales (incendios, explosiones y fugas tóxicas), generalmente, implican la emisión de una o más sustancias de un estado inicial de confinamiento al exterior, seguido de una vaporización y una dispersión. Pero, en particular, para el caso de fugas que dan lugar a una nube tóxica, desde un punto de vista de evaluación de consecuencias, resulta de mayor interés focalizarse en el desarrollo evolutivo de las fases de emisión y dispersión, ya que son estas dos etapas las que tienen una mayor incidencia en términos de cómo se ve afectado el lugar o área poblada que es alcanzado por dicha nube.

En primer lugar, la emisión está condicionada por el depósito y el estado en que la sustancia se almacena (presión y temperatura), por sus características termodinámicas y por la posición y dimensión de la rotura. Existen una gran variedad de circunstancias que pueden dar lugar a una emisión de una sustancia tóxica: un fallo en la integridad de la planta industrial, un escape de válvula, etc. En vista de esto, es relativamente complicado estimar la cantidad y duración de la emisión, ya que es una etapa sujeta a una gran incertidumbre.



**Figura 1.** Evolución de una nube de gas denso («Guía técnica de Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II])»)

En la literatura se proporcionan algunos recursos que permiten estimar la emisión de flujo a través de la mecánica de fluidos (Sinnott 2013) (Perry, Green y Maloney 1997) (Levenspiel 1993). La forma en que esta emisión ocurre tiene una gran influencia en la naturaleza y el efecto de la fuga e incide de forma directa sobre cualquier nube de vapor que se pueda formar.

Una vez producida la emisión a la atmósfera, si el fluido contenido es un líquido, puede tener lugar la vaporización antes de que se forme la nube de gas. Aunque es un proceso previo a la dispersión, es importante porque la vaporización determina la velocidad a la que el material entra en la nube y también determina la cantidad de aire que queda atrapado en ella (Lees 2012).

Finalmente, el proceso de emisión y vaporización va seguido de una dispersión del vapor para formar una nube. Pese a que históricamente la dispersión de contaminantes se ha asociado más a la emisión de sustancias en chimeneas industriales, cada vez existe una mayor cantidad de estudios sobre la dispersión de sustancias químicas peligrosas en plantas de proceso del ámbito de la ingeniería química (Kim, Jung y Kang 2015) (Zhang, Oldenburg y Pan 2016) (Annick et al. 2017) (Tong et al. 2017).

## **1.2. Dispersión de fugas tóxicas**

Una fuga tóxica, a diferencia de los otros dos peligros más conocidos (incendios y explosiones), es la menor causa general de los accidentes (inferior al 12% considerando que no todas las nubes de gas son tóxicas) (Planas et al. 2014), pero es el suceso que puede cubrir un mayor área (por norma general, en la práctica, no suelen alcanzar distancias superiores a los 3 km) y presentar una mayor peligrosidad respecto a sus consecuencias. De hecho, no es casualidad que el accidente de Bhopal, ocurrido en 1984, tuviese unos efectos terribles sobre los más de 520.000 residentes que se expusieron al gas de isocianato de metilo, donde se estima que casi 8.000 personas murieron durante las primeras semanas y más de 100.000 padecieron lesiones permanentes (Eckerman 2005).

El riesgo que presenta una fuga de contaminante depende, principalmente, del tipo de sustancia química fugada, del alcance de la nube y de las condiciones de exposición (no es lo mismo una exposición breve a alta concentración de forma repentina que una exposición prolongada a baja concentración, pero a lo largo de toda una vida laboral, aunque ambas son perjudiciales para el individuo en cuestión). Una fuga de un compuesto tóxico como el cloro, por ejemplo, puede tener unas consecuencias mucho más devastadoras, incluso superior a las de un incendio o una explosión, que si el químico vertido fuese otro. Por otra parte, la forma en que la dispersión se propaga por el ambiente va a depender de aspectos como la acción del viento (dirección y velocidad), la turbulencia o estabilidad atmosférica, la temperatura, la humedad relativa, etc. El análisis de esta dispersión es un aspecto importante en la modelización de accidentes, ya que permite establecer medidas de prevención y protección proporcionales al nivel y extensión de las consecuencias esperadas.

Por todo ello, el presente trabajo pretende realizar, en primer lugar, un análisis histórico de accidentes en la industria química donde hayan tenido lugar dispersiones de sustancias tóxicas, haciendo especial énfasis en las consecuencias directas sobre las personas. En segundo lugar, se realiza un estudio del marco legal español relativo a las metodologías de zonificación de emergencia, repasando los valores límite en aire de determinadas sustancias y los efectos que pueden provocar sobre humanos. Todo ello permite justificar la determinación de las concentraciones que caracterizan las zonas de planificación, las cuales condicionan el alcance de las mismas, y determinar así su ubicación. Por último, se seleccionan una serie de casos de estudio del análisis previo realizado y se realiza la modelización y simulación mediante el programa informático ALOHA para determinar el alcance de las consecuencias y evaluar la idoneidad de las medidas de protección civil. Los resultados obtenidos pretenden ser de utilidad para desarrollar estrategias de prevención y mitigación de fallos del proceso, aportando resultados esclarecedores para desarrollar planes de emergencia más eficientes y evaluar riesgos en tiempo real para gases peligrosos.

### 1.3. Objetivos

Para cumplir con los puntos propuestos se fijan los siguientes objetivos:

- Realizar una recopilación de accidentes históricos relativos a dispersión de fugas tóxicas.
- Analizar estadísticamente la información disponible.
- Seleccionar una serie de casos de estudio.
- Recopilar la legislación vigente en materia de protección civil aplicada en España.
- Modelizar y simular los casos de estudio previamente seleccionados: determinación de las zonas de alerta e intervención.
- Interpretar los resultados y discutir la idoneidad de las metodologías de zonificación según los registros de los casos seleccionados.



## 2. Análisis histórico

El propósito de realizar este análisis histórico es obtener una visión más global de las fugas tóxicas, obteniendo información que, en otras circunstancias, puede pasarse por alto, con el fin de identificar los factores que conducen a este tipo de accidentes y utilizar las lecciones aprendidas para la prevención de accidentes futuros. Se espera que este estudio pueda ser útil para el desarrollo de nuevos conocimientos relativos a la seguridad y control de daños.

### 2.1. Fuentes de información: bases de datos

En la actualidad existen diferentes bases de datos y recursos que pueden ser empleados como fuentes de información. En este caso, para llevar a cabo el análisis histórico, la fuente de información principal que se ha empleado es la base de datos MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*), desarrollada y gestionada por el SRD (*Safety and Reliability Directorate*) en representación del *Major Hazards Assessment Unit* y del *UK Health and Safety Executive*. MHIDAS incluye incidentes de más de 95 países de todo el mundo, particularmente de USA, UK, Canadá, Francia y la India. Fue creada en el año 1980, pero también incluye incidentes ocurridos durante los primeros años del siglo XXI hasta noviembre del 2006, fecha en la que fue actualizada por última vez. La versión utilizada, ejecutable a través de un CD-ROM (MHIDAS 2007), contiene más de 14.000 registros de accidentes. El principal problema es que muchos registros de MHIDAS están incompletos o los detalles que proporcionan sobre determinados incidentes no son suficientes. Esta limitación de la base de datos también ha sido comentada por otros autores (Hauer y Hakkert 1988). Este inconveniente, sumado a que MHIDAS dejó de actualizarse en el año 2006, ha hecho que sea necesario consultar otras bases de datos e información de libre acceso para obtener registros, en determinados casos, algo más precisos y actualizados. Hay un gran número de bases de datos específicas que tratan casos históricos, pero las fuentes de información que se han utilizado, tanto por la gran cantidad de accidentes que hay registrados como por su facilidad para ser consultadas y revisadas por el usuario, son:

- FACTS (*Failure and Accidents Technical information System*) se compone principalmente de fuentes de información extraídas de revistas especializadas y periódicos y, en la actualidad, contiene información de 25.000 accidentes que involucran materiales o mercancías peligrosas.
- eMARS (antiguamente denominadas MARS, *The Major Accident Reporting System*), es una base de datos gestionada por la comisión europea sobre los accidentes más importantes ocurridos en cada país, de acuerdo a la Directiva Seveso.

- ARIAS (*Analysis, Research and Information on Accidents*), la cual recopila accidentes históricos que tuvieron o pudieron haber tenido efectos adversos sobre la seguridad o salud pública, agricultura y medio ambiente.

La particularidad más destacable de MHIDAS respecto a las otras bases de datos es que cada registro corresponde a una sustancia que ha participado en un accidente y no a un accidente determinado. De esta forma, para un accidente existen tantos registros como sustancias han participado.

No obstante, los resultados obtenidos de las bases de datos no pueden considerarse definitivos. Esto se debe a que hay accidentes que han ocurrido pero que pueden no haber sido registrados a causa de no desencadenar unos efectos significativos. Aunque son herramientas útiles en la predicción de consecuencias de accidentes futuros, hay innumerables factores diferentes que intervienen en cada accidente, por lo que los análisis históricos, pese a ser válidos, hay que analizarlos con prudencia, ya que los resultados pasados pueden no ser extrapolables en toda su extensión a los presentes. Además, cada vez se cuenta con mayores sistemas de seguridad y se dispone de medios de intervención más efectivos, por lo que es de esperar que la ocurrencia en el presente de un accidente de magnitud similar a uno del pasado, en la actualidad tenga un potencial impacto más reducido (Carol, Vilchez y Casal 2000).

## 2.2. Metodología de análisis: criterio de selección

La mayor proporción del material (367 entradas) se ha recopilado de MHIDAS, ya que la información contenida en MHIDAS es, generalmente, más completa que en el resto de bases de datos y, además, está mejor estructurada para el análisis de tendencias y la obtención de resultados estadísticos. El criterio de selección seguido se detalla a continuación.

MHIDAS contiene un campo IT (en la Tabla 1 se muestran todos los campos empleados durante el estudio) relativo a cómo ha sido desarrollado el incidente en cuestión, describiendo los eventos de forma simplificada. Básicamente se utilizan cuatro palabras clave (*EXPLODE* para explosión, *FIRE* para incendio, *RELEASE* para fuga y *GASCLD* para nube de gas) junto con otras más detalladas (*FIREBALL*, *FLASHFIRE*, *POOL*, *BLEVE*, etc.). En este caso, el primer filtrado se ha realizado buscando todos aquellos sucesos clasificados como nube de gas. Después de esta primera selección se ha aplicado un segundo filtro en el campo MH para focalizar el análisis únicamente sobre dispersiones tóxicas, es decir, aquellas nubes de gas que involucren sustancias perjudiciales para la salud humana.

**Tabla 1.** Campos utilizados en la base de datos MHIDAS de este estudio

<b>Campo MHIDAS</b>	<b>Descripción</b>
AN	Código identificativo del registro
DA	Fecha del incidente
LO	Localización del incidente
PD	Densidad de población en la zona del incidente
IT	Tipo de incidente
OG	Origen general y específico
GC	Causa general
SC	Causa específica
MN	Nombre de la sustancia
MH	Riesgos del material
QY	Cantidad de sustancia involucrada
DR	Daño material
IY	Año del incidente
CR	Fuente del registro
KR	Número de muertos
IR	Número de heridos
ER	Número de evacuados
AB	Resumen del incidente

Posteriormente, con el objetivo de completar los registros obtenidos por MHIDAS y obtener una información más precisa y actualizada al año 2018 se ha realizado una búsqueda detallada. Las principales fuentes de información de libre acceso empleadas en estos casos han sido:

- Otras bases de datos: MARS, FACS y ARIAS
- Libros
- Artículos científicos
- Páginas web
- Informes técnicos
- Informes de accidentes

Uno de los aspectos críticos en este segundo punto ha sido discriminar entre fugas tóxicas y fugas que no lo son. En estas fuentes alternativas de información no se dispone de campos tan claros como en MHIDAS, por lo que ha sido necesario realizar una búsqueda más detallada. Para ello, uno de los principales criterios discriminatorios ha sido considerar la tipología de las sustancias implicadas en el accidente. Las sustancias tóxicas más comunes y peligrosas (previamente obtenidas en el análisis histórico de MHIDAS), junto con los principales gases tóxicos típicos de la industria química (ver Tabla 2) ha hecho posible acotar los criterios de búsqueda. Por otra parte, accidentes que tenían como suceso iniciador una fuga que podía producir una explosión o un incendio, y que éstas a su vez podían derivar en una dispersión de gas tóxica, también se han tenido en cuenta.

**Tabla 2.** Gases industriales principales con efectos tóxicos (Lees, Frank 1996)

Gas	Efectos tóxicos
Amoniaco	Irritante
Bromo	Irritante
Cloro	Irritante
Cloruro de hidrógeno	Irritante
Cianuro de hidrógeno	Sistémico
Fluoruro de hidrógeno	Sistémico (envenenamiento por fluoruro), irritante
Sulfuro de hidrógeno	Sistémico, irritante
Fosgeno	Irritante
Dióxido de azufre	Irritante

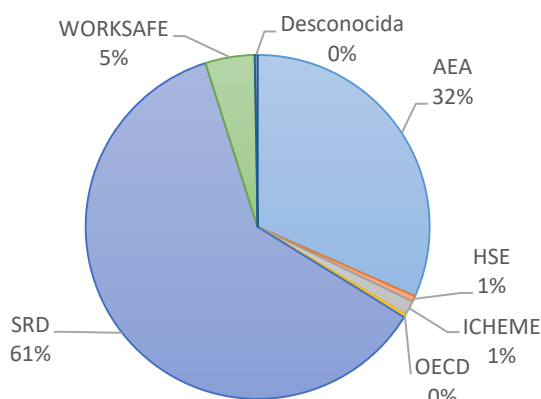
Después de realizar estas búsquedas simultáneas se han obtenido 359 entradas adicionales, sumando un total de 726 registros. Debido a que se ha trabajado con una gran cantidad de datos procedentes de diferentes fuentes, algunos de estos registros eran duplicados de accidentes ya recopilados. Para evitar contabilizar el mismo accidente varias veces se ha seguido el siguiente procedimiento manual de filtrado: comparación de “fecha del accidente”, “localización del accidente” y “sustancias involucradas en el suceso” con los diferentes registros de cada fuente de información. Una vez aplicado el criterio de selección para evitar solapar accidentes idénticos se ha obtenido un total de 583 registros, de los cuales 525 pertenecían a accidentes diferentes y los 58 restantes eran registros duplicados de accidentes que habían involucrado más de una sustancia (una entrada por cada sustancia).

## 2.3. Resultados del análisis histórico

Tras aplicar los criterios de selección, se han analizado estadísticamente los diferentes accidentes para identificar tendencias o variables en los datos recopilados.

### 2.3.1. Fuente de los registros

En primer lugar, en relación al origen de la información recopilada por MHIDAS, tal y como se observa en la Figura 2, aproximadamente el 93% de las entradas se recogen por el AEA (*Atomic Energy Authority*) y SRD (*Safety and Reliability Directorate*) (siendo éste el que posee la mayor cantidad de registros recopilados). En algo menos del 1% de las entradas no se indica la fuente de información.



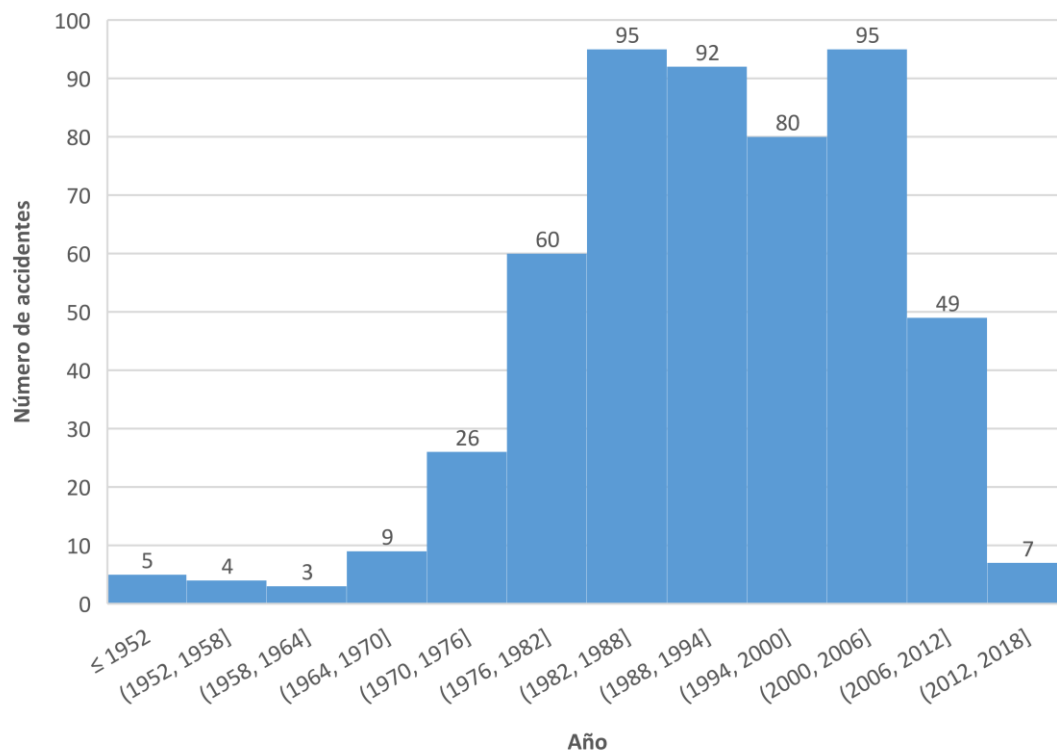
**Figura 2.** Origen de la información de la base de datos MHIDAS

Estos datos muestran la clara homogeneidad que presenta la base de datos MHIDAS en la forma en que se recopilan los datos de accidentes relativos a fugas tóxicas. Los porcentajes mostrados no hacen más que evidenciar la fuerte influencia del SRD en el desarrollo y gestión de MHIDAS, a su vez sustentada por el *AEA Technology plc*.

En caso de tener en cuenta el resto de fuentes de información (no solamente MHIDAS), el origen ya no es tan evidente: el 37% de los registros carecen de fuente. Esto se debe a que las bases de datos FACTS, MARS o la propia ARIAS, no presentan un campo específico habilitado a la “Fuente del Registro” que identifique la institución que ha recopilado y/o codificado el accidente, sino que se nutren de diferentes revistas especializadas, periódicos, etc.

### 2.3.2. Distribución de los accidentes a lo largo del tiempo

La evolución de los accidentes recopilados que involucran fugas tóxicas se representa en la Figura 3. Tal y como se puede observar, el número de accidentes se ha visto notablemente incrementado en las últimas décadas. La mayoría de los accidentes (aproximadamente un 80%) se han registrado en los últimos 40 años. Este tipo de tendencia es similar a la que se encuentra en otros análisis históricos exhaustivos ocurridos en la industria química (Vílchez et al. 1995) y zonas portuarias (Darbra y Casal 2004).



**Figura 3.** Evolución histórica de accidentes con fugas tóxicas

El comportamiento del aumento acentuado a partir de la década de los 80 se puede atribuir a varios factores. En primer lugar, con el paso de los años el acceso a la información sobre accidentes se ha ido mejorando de forma gradual. Por otro lado, hay que tener en cuenta que algunas de las bases de datos empleadas en este estudio han sido creadas en la segunda mitad del siglo XX, por lo que parece razonable que se haya registrado una mayor cantidad de información de incidentes ocurridos a partir de esos años. Esto hace que los datos obtenidos deban tomarse con precaución dado que, si se hubiese tenido al alcance este tipo de recursos desde el inicio, los registros de accidentes no habrían sido tan escasos y el incremento probablemente no sería tan acentuado. Además, en las últimas décadas, se ha producido un aumento significativo de la actividad industrial a nivel mundial, lo que conlleva una mayor probabilidad de ocurrencia de este tipo de sucesos. No obstante, en las últimas dos décadas, se observa un estancamiento, seguido de una progresiva disminución con el paso de los años. Esta tendencia última puede atribuirse al hecho de la implementación de una legislación cada vez más estricta (Directiva Seveso I, II y III) («Comisión Europea, 1982-2012»), con mejoras en el ámbito de la seguridad, el establecimiento de directivas más restrictivas, el progreso de las técnicas de riesgo y, en general, una población globalmente más concienciada.

### 2.3.3. Densidad de población

Para las entradas correspondientes a la base de datos MHIDAS existe un campo que incluye información sobre la densidad de población de las zonas donde tiene lugar el accidente. Desgraciadamente, el estudio estadístico de este campo se ha limitado únicamente a MHIDAS, siendo imposible incluirlo para la totalidad de los accidentes estudiados, ya que no es un campo explícito en el resto de fuentes. Pese a eso, se ha creído conveniente estudiarlo dada su importancia, sobre todo en relación a las consecuencias directas sobre la población. Las categorías que se distinguen son: zonas urbanas (ciudad o pueblo/aldea) y rurales (población diseminada o áreas sin población). Únicamente la información es conocida en 173 casos. Para los registros conocidos, la mayoría de los accidentes, aproximadamente el 84%, tienen afectación sobre zonas urbanas, mientras que sólo el 16% ocurren en áreas rurales (Tabla 3).

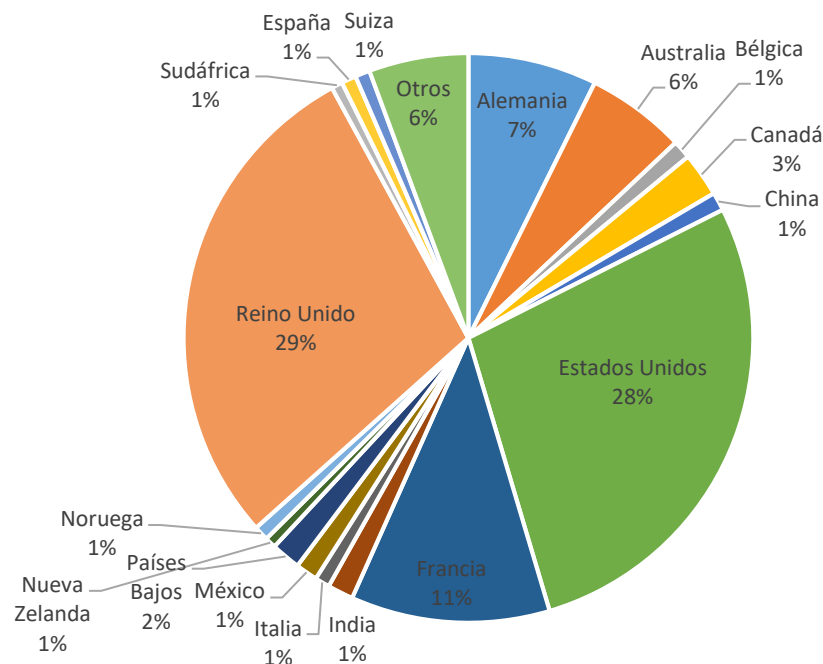
**Tabla 3.** Datos sobre la distribución de la población

Densidad de población	Número de entradas	% del total
Urbana	145	83,82
Rural	28	16,18

Los datos obtenidos ponen de manifiesto que la mayoría de las fugas tóxicas han tenido una mayor incidencia sobre regiones con mayor población, con el riesgo que ello conlleva. En cierta medida es lógico, puesto que la mayor parte de las instalaciones industriales se ubican en regiones próximas a pueblos o ciudades, que destacan por contener grandes núcleos de población o centros neurálgicos. No obstante, los porcentajes deben tratarse con cautela, ya que los accidentes ocurridos sobre zonas urbanas son mucho más evidentes que los ocurridos sobre zonas rurales, por lo que la posibilidad de ser registrados en este segundo caso es mucho menor.

### 2.3.4. Localización de los accidentes

En la Figura 4 puede observarse una distribución por países de los incidentes registrados en los que ha tenido lugar una fuga tóxica. Los datos representados han sido tomados a partir de los datos en los que la localización es conocida (478 casos de los 525 accidentes diferentes). El número de registros con localización desconocida se debe al hecho de que para los accidentes registrados a partir del año 2007 ha sido necesario recurrir a otras fuentes de información y, desafortunadamente, algunas de éstas (MARS, por ejemplo) no especifican los accidentes por país, por lo que no ha sido posible extender el estudio para estos casos. Por su parte, la categoría “otros” incluye todos aquellos países con una contribución de registros menor al 0,5% respecto al total.



**Figura 4.** Localización de las fugas tóxicas

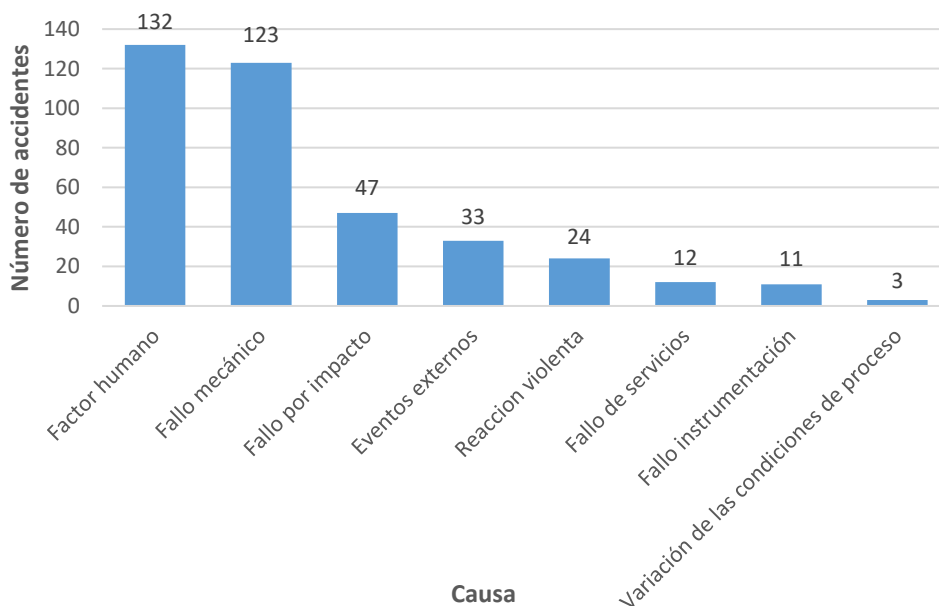
El 53% de los accidentes, aproximadamente, se encuentran en la Unión Europea, mientras que otro gran porcentaje (38%) se reparte entre países como Estados Unidos, Canadá, México, Australia, Noruega y Nueva Zelanda. Por tanto, se puede decir que más del 90% de los accidentes tienen lugar en países desarrollados. En cierta forma, estos datos evidencian el desarrollo de la tecnología, directamente relacionada con el avance de la sociedad, y la presencia de grandes instalaciones en este tipo de países con un mayor riesgo inherente asociado. Los datos obtenidos no son definitivos, ya que las limitaciones de las bases de datos (sobre todo en sus primeros años), y la propia búsqueda manual, puede haber provocado que ciertos accidentes no se hayan tenido en cuenta. Además, el alcance y la precisión de los accidentes registrados en ocasiones es difuso. Es más sencillo tener información detallada de incidentes ocurridos en los Estados Unidos, Reino Unido y otros países de la Unión Europea, que no de China, Rusia o los Estados Balcánicos, por poner unos ejemplos, ya que estos países reciben mucha menos publicidad. De hecho, este problema ya ha sido discutido en otros casos (Badoux 1985). No obstante, en cómputo general, son valores que sí reflejan con cierta credibilidad lo estudiado.

### 2.3.5. Causas

En relación al estudio que provocan las causas de un accidente, especialmente interesantes desde el punto de vista del análisis de los mismos, se ha considerado la clasificación general que utiliza MHIDAS en la que se tienen en cuenta ocho posibles aspectos: fallo mecánico, impacto, factor humano, fallo de



instrumentación, fallo de servicio, reacción violenta, eventos externos y variación de las condiciones de proceso. Uno de los principales problemas en el análisis de este punto es que un mismo accidente puede tener asociado más de una causa, por lo que al sumar los porcentajes el valor puede ser superior a 100. Para lidiar con esta limitación lo que se ha hecho es realizar un recuento de todos los registros considerando únicamente su causa principal. El número total de entradas con causas conocidas es 385, por lo que en aproximadamente el 27% de los registros esta información no ha sido introducida. Los datos resultantes se muestran en la Figura 5.



**Figura 5.** Incidentes con causas generales conocidas

Tal y como se observa, la causa más frecuente es el factor humano (34%), seguido del fallo mecánico (32%). El resto de causas quedan repartidas en el 34% restante. Aunque la lectura de los datos no permite identificar la gravedad de los accidentes, el análisis histórico pone de manifiesto que el error humano es el aspecto más frecuente, por lo que destinar recursos y esfuerzos en intentar proporcionar una formación del personal adecuada se antoja como uno de los aspectos fundamentales de cara a intentar reducir el número de fugas tóxicas. Por otro lado, resulta especialmente interesante el reducido porcentaje (1%) de fugas tóxicas que se producen a causa de cambios en las condiciones del proceso.

En vista de que el factor humano y mecánico representan más de un 60% del total, se ha realizado un desglose de ambas causas con el objetivo de analizar de forma más minuciosa la causa específica que las produce. Los datos se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Causas específicas

<b>Causas específicas fallo mecánico</b>	<b>Número de accidentes</b>
Corrosión	27
Fuga de válvula	27
Por sobrepresión	9
Fuga junta	8
Por sobrecalentamiento	7
Otros fallos metalúrgicos	6
Fuga por acoplamiento o brida	5
Fallo en manguera	2
Fallo en válvula de alivio	2
Por sobrecarga	1
Fallo de soldadura	1
No definido	28
<b>Causas específicas factor humano</b>	
Error de dirección general	26
Operaciones generales	17
Fallo en el procedimiento	14
Mantenimiento general	9
Uso de materiales incompatibles	2
Ventoe accidental	1
Fallo para conectar o desconectar	1
Error en la construcción	1
Accidente en el drenaje	1
Fallo por aislamiento/drenaje antes de desacoplamiento	1
Sobrellenado	1
No definido	58

Como se puede observar, en relación a los fallos mecánicos, las causas principales son la corrosión y las válvulas, siendo éstas los componentes con más propensión a fallar (ambas suman una contribución del 44% en la categoría). Los fallos por corrosión indican la importancia del mantenimiento para mantener unas condiciones adecuadas de seguridad. Por su parte, relativo a las causas específicas que involucran el factor humano, puede verse que la mayor cantidad son producidas por errores generales en la dirección y fallos en la ejecución de las operaciones. Una vez más, en este caso, los resultados evidencian, por un lado, el alto grado de relevancia que tiene una correcta formación de los operarios y, por otro, la importancia de la gestión y la organización en los entornos de trabajo. Aun así, hay que tener precaución con estos datos, ya que en una cantidad razonable de entradas se desconocía la causa específica (23% para fallo mecánico y 44% en el caso de los factores humanos).

### 2.3.6. Origen del accidente

Las bases de datos empleadas presentan siete campos diferentes en relación a la actividad o al sitio donde tiene lugar el accidente, estos son: planta de proceso, transporte, planta de almacenamiento, doméstico/comercial, carga y descarga, almacén de productos y almacén de residuos. Solamente en el 11% de los casos (58 accidentes de los 525 registros) es desconocida esta categoría. La Figura 6 muestra los resultados para los casos conocidos.

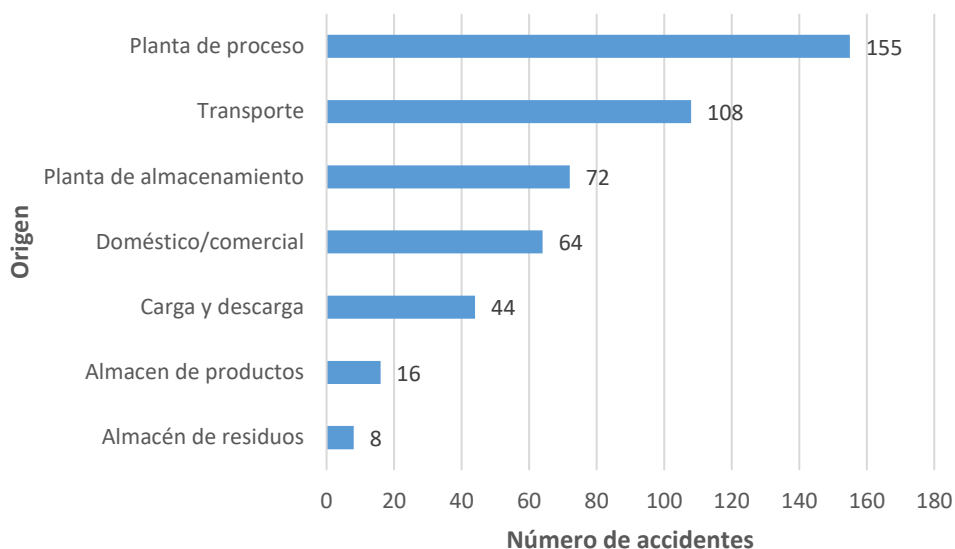


Figura 6. Origen de los accidentes

Como puede observarse, la mayoría se reparte entre plantas de proceso (33%) y transporte (23%). Combinados representan más del 50% de los casos, por lo que se ha analizado en detalle el origen específico de ambos (Tabla 5). Puesto que las áreas de proceso son las zonas donde generalmente se focaliza el mayor índice de accidentes, de acuerdo con los datos obtenidos, es necesario hacer un esfuerzo para mejorar la seguridad de estas zonas. Además, es importante no menospreciar la gravedad de los accidentes en base a los resultados obtenidos, ya que, por ejemplo, la operación de carga y descarga, que no ocupa un lugar destacado en este caso (10%), es notablemente peligrosa.

Tabla 5. Origen específico

Origen específico para plantas de proceso	Número de accidentes
Tubería de proceso	25
Reactor	24
Depósitos de proceso	7
Otro	7
Bombas/compresores	4

Intercambiadores de calor	2
Máquina de transmisión	1
Equipo para la reducción/ampliación del tamaño	1
Depósitos de almacenamiento presurizado	1
No definido	83

#### **Origen específico para transporte**

Cisternas para ferrocarril	26
Contenedores de transporte portátiles	21
Cisternas para carreteras	21
Barco	20
Tubería exterior	12
Tanque contenedor	2
Barcaza	1
No definido	5

Las zonas, dentro del área de proceso, más propensas a padecer este tipo de accidentes son las propias tuberías y los reactores (ambas suman un 31% de los accidentes en plantas de proceso). Existe un elevado porcentaje de orígenes desconocidos de los accidentes que tienen lugar en plantas de proceso (54%) si se comparan con los no definidos para el transporte (5%), así que sería conveniente realizar investigaciones más detalladas en los accidentes de esta categoría con el fin de reducir el número de casos sin definir. Finalmente, en relación al transporte, más del 60% de los accidentes involucran transporte por carretera, ferrocarril o mar. Estos datos no sorprenden, ya que una de las funciones básicas a nivel industrial es el movimiento de mercancías peligrosas desde el punto de producción hasta el centro consumidor los cuales, generalmente, no se encuentran próximos entre sí, por lo que un número elevado de accidentes ocurren cuando se llevan a cabo este tipo de actividades. Los porcentajes de este estudio se encuentran en relativa consonancia con otros análisis históricos realizados en la industria química (Vílchez et al. 1995) a escala mundial.

### **2.3.7. Sustancias involucradas**

La clasificación de los accidentes en función del tipo de sustancia involucrada es un proceso difícil por varios motivos. En primer lugar, hay que considerar que en algunos accidentes interviene más de una sustancia (por esta razón, el número de registros (583) es más grande que el número de accidentes (525)). En segundo lugar, existen una gran variedad de sustancias clasificadas como tóxicas, según el filtro “*Material Hazard*” de las bases de datos, pero que no se repiten con excesiva frecuencia en los accidentes. Por estos motivos, y con el objetivo de acotar la lista de sustancias en el análisis de fugas tóxicas, lo que se ha hecho es seguir el criterio de clasificación para sustancias gaseosas tóxicas del capítulo 3.1 del *Globally Harmonized System* (MIYAGAWA 2010). Los criterios de clasificación (los cuales se pueden observar en la literatura) que ahí se detallan se basan en considerar cinco categorías

diferentes teniendo en cuenta valores de toxicidad aguda expresados como (aproximadamente) valores LD<sub>50</sub> (dosis letal para el 50% de la población, oral o dérmica) o LC<sub>50</sub> (inhalación). No obstante, dado que el ámbito de estudio en este caso únicamente considera la interacción con el hombre de las sustancias tóxicas dispersas en el aire, la vía de entrada más importante es la respiratoria. Dentro de este contexto, las sustancias de mayor interés se pueden clasificar en irritantes o no irritantes, éstas últimas presentando, en su mayoría, características asfixiantes:

- Las sustancias irritantes son aquellas que presentan una elevada reactividad con los tejidos biológicos. Se caracterizan por producir extensas lesiones en la mucosa respiratoria. Un parámetro importante en los gases irritantes es su grado de solubilidad en agua que determina, en gran medida, la parte del sistema respiratorio que es atacada (ej. de sustancias: amoníaco, sulfuros, cloro y fosgeno).
- Las asfixiantes pueden actuar desplazando el oxígeno atmosférico o ejerciendo una acción química sobre la sangre que impide el transporte de éste hasta los tejidos (las más importantes son: cianuros y derivados y el monóxido de carbono).

De acuerdo con esta clasificación última, y teniendo en consideración los gases tóxicos más comunes en la industria química (Tabla 2) (Lees, Frank 1996), en la Tabla 6 se muestran las sustancias que han intervenido en mayor medida en los incidentes registrados.

**Tabla 6.** Sustancias más importantes involucradas en accidentes de fugas tóxicas

<b>Sustancia involucrada</b>	<b>Número de registros</b>	<b>% respecto al total</b>
Amoníaco	103	18
Cloro	90	15
Cloruro de hidrógeno	84	14
Sulfuro de hidrógeno	24	4
Monóxido de carbono	15	3
Dióxido de azufre	12	2
Fluoruro de hidrógeno	11	2
Fosgeno	10	2
Cianuro de hidrógeno	1	0
Otras sustancias químicas	230	39
No definido	3	1

Las sustancias mostradas tienen una contribución del 60% respecto al número de entradas totales, siendo el amoníaco, cloro y cloruro de hidrogeno las tres más frecuentes. Dichos gases son irritantes, con efectos que pueden variar desde una leve molestia hasta una congestión intensa de las vías respiratorias o edema pulmonar y, finalmente, la muerte inmediata del individuo. El amoniaco es más soluble en agua que el cloro, así que tiende a atacar el tracto respiratorio superior. En vista de los resultados obtenidos, y dado que, especialmente, el cloro y el amoniaco son gases tóxicos que se

manipulan a gran escala en forma licuada y, por lo tanto, se dispersan fácilmente presentando un peligro tóxico grave, las plantas industriales que manejan este tipo de sustancias tóxicas deberían diseñarse con el objetivo de minimizar las fugas accidentales. No solamente se trata de un asunto destinado a mejorar el diseño mecánico de la planta en cuestión, sino más bien a trabajar bajo condiciones inherentemente más seguras (por ejemplo, empleando sustancias alternativas), minimizando así los efectos de cualquier fallo que pueda producirse con las sustancias involucradas en el proceso. Otras sustancias como el sulfuro de hidrógeno (4%), monóxido de carbono (3%), etc., presentan porcentajes mucho más bajos. Finalmente, aquellas sustancias que, pese a ser tóxicas, no son tan comunes y no presentan efectos tan graves sobre las personas se han incluido en la categoría “otras sustancias químicas”. El porcentaje obtenido en este último caso (39%), obviando la incertidumbre asociada a las bases de datos, evidencia que este tipo de sustancias tienen un peso menor en los accidentes que causan fugas tóxicas.

### 2.3.8. Cantidad de sustancia

En relación a las sustancias que han intervenido en los accidentes, resulta interesante determinar la cantidad involucrada, ya que el grado de magnitud de este parámetro está estrictamente relacionado con los efectos que puede provocar la sustancia considerada sobre los seres humanos. El número de registros en los que se especifica esta información es bastante alto (72%). En la Tabla 7 se muestran los resultados para los casos conocidos.

**Tabla 7.** Cantidad de sustancia involucrada para los casos conocidos

	Número de accidentes	% del total conocido
Entre 0 y 1 tonelada	70	48
Entre 1 y 10 toneladas	31	21
Entre 10 y 20 toneladas	12	8
Entre 20 y 50 toneladas	17	12
Entre 50 y 100 toneladas	6	4
> 100 toneladas	10	7

En aproximadamente la mitad de los accidentes, la cantidad vertida al ambiente es inferior a una tonelada, seguido por cantidades de entre una y diez toneladas (21%) y de entre veinte y cincuenta toneladas (12%). Cabe destacar que, prácticamente, el número de accidentes registrados entre diez y veinte toneladas es casi idéntico al de accidentes con emisiones de más de cien toneladas. No obstante, estos resultados deben tomarse con precaución, dado que cuantificar de forma precisa la cantidad de sustancia involucrada en la nube de gas es relativamente complicado (de hecho, se evidencia con el bajo número de accidentes conocidos (28%) en los que se especifica este campo).

### 2.3.9. Pérdidas económicas

En una cantidad muy reducida de accidentes son conocidas las pérdidas económicas derivadas de los mismos (9%). La escasa información relativa a este campo evidencia la reticencia de las industrias a publicar esta información y la dificultad para hacerlo. Hay que tener en cuenta que es complicado cuantificar los daños originados por un accidente en dinero, ya que intervienen muchos factores (daños a equipos, movilización de brigadas de emergencia, desarrollo de planes de evacuación, etc.) que pueden ser alterados, agravados o atenuados en función del momento en el que suceden. Con el paso de los años se han ido adoptando mayores medidas de seguridad, dando lugar a medios de intervención más efectivos. Por otra parte, es importante tener en cuenta que la productividad de las plantas industriales hoy en día es mucho más grande que sus equivalentes en el pasado, por lo que es imposible extrapolar estos daños a través de las diferentes épocas. Además, de forma rigurosa, la comparativa de pérdidas económicas entre años es especialmente difícil, puesto que interviene el fenómeno de la inflación a medida que pasa el tiempo, haciendo que continuamente se produzcan cambios en los costes económicos asociados a cualquier daño. A esto hay que sumarle que los valores proporcionados por las bases de datos empleadas no proporcionan información de si las pérdidas económicas para cada año están actualizadas o no respecto al año de referencia. Pese a todas estas limitaciones, se ha llevado a cabo un análisis de los daños económicos provocados por los accidentes; los datos se muestran en la Figura 7:

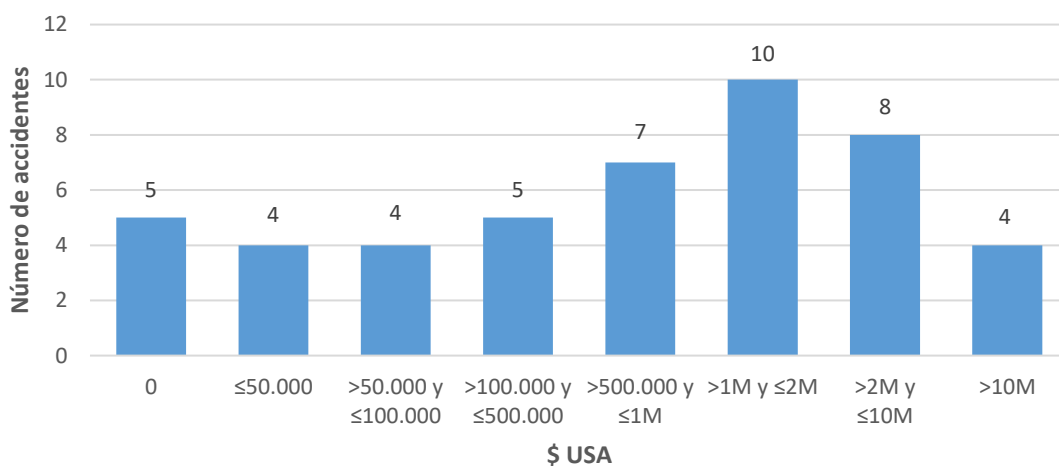


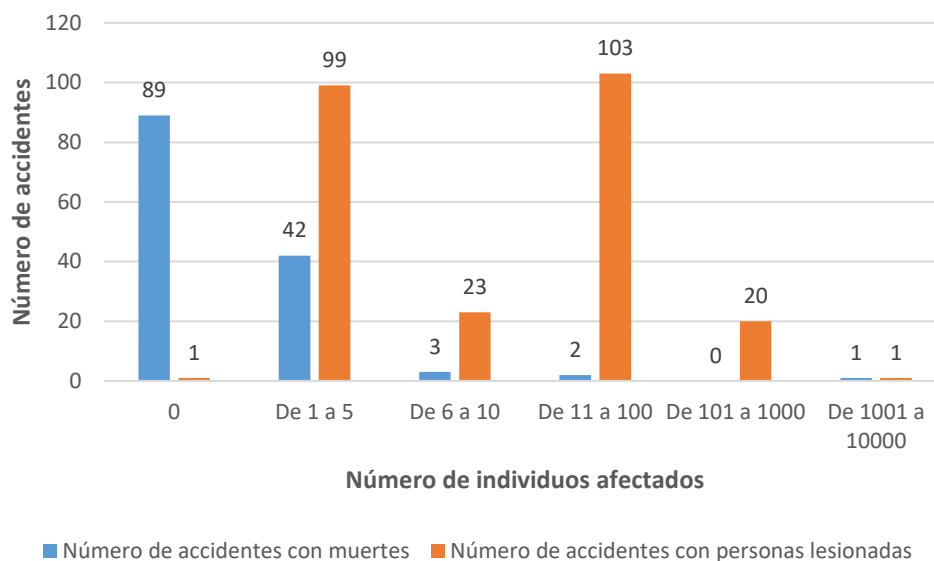
Figura 7. Pérdidas económicas para los casos conocidos

En la mayoría de los casos estudiados (60%) se tienen daños equivalentes a costes por encima de los 500.000 USD. En un número relativamente bajo de accidentes (9%) se tienen pérdidas económicas superiores a los 10M USD. Finalmente, en aproximadamente un 11% de las entradas se especifica que no ha habido pérdidas económicas (este valor puede no ser relevante, ya que puede haberse puesto

de forma arbitraria por parte de las fuentes de información para algún accidente donde las pérdidas económicas fuesen desconocidas).

### 2.3.10. Personas afectadas por el accidente

Una de las formas más rigurosas de cuantificar las consecuencias de una fuga tóxica es analizando el número de personas afectadas por el suceso. Dependiendo de cuál sea la gravedad del accidente, y de su ubicación respecto a la población, las personas se ven afectadas en mayor o menor grado, pudiendo, en el peor de los casos, sufrir la muerte, padecer determinadas lesiones o simplemente ser evacuadas. De acuerdo a esto, las bases de datos empleadas clasifican la población afectada en: número de muertes, número de personas con lesiones y número de personas evacuadas. Del total de accidentes considerados, en 255 entradas (49%) se dispone de información relativa a muerte y/o lesiones de personas. En el 51% restante, uno de los campos tenía valor cero y el otro era desconocido, o ambos desconocidos. En la Figura 8 se muestra toda la información relativa a estas dos categorías. Sólo en el 46% de todas las entradas se indica el número de muertos causados por el accidente, para el resto no se refleja ningún valor (ni siquiera 0). En el 64% de todas las entradas (525) se especifica el número de personas con lesiones, mientras que el resto no contiene ningún tipo de información.



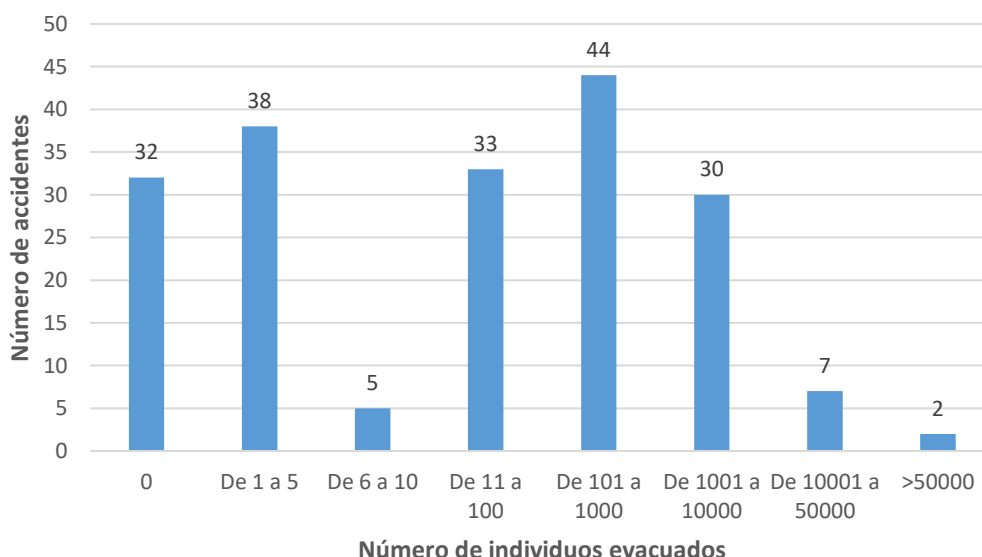
**Figura 8.** Número de accidentes que involucran muertes y personas con lesiones

En relación al número de muertes, el 19% de los accidentes con datos disponibles presentan fallecidos ( $\geq 1$ ), mientras que en el 96% de las entradas en las que se indican detalles han provocado, como mínimo, lesiones en una persona. Tal y como puede observarse, el rango más común de fallecidos es entre 1 y 5 muertos (88%). El número total de muertos es 2.149. Por lo que respecta al rango más común de personas con algún tipo de lesión, la mayor cantidad de accidentes registrados se encuentra



en el intervalo comprendido entre 11 y 100 individuos (42%). En total, 18.633 personas sufrieron algún tipo de lesión, ya fuese leve o grave. En base a los datos obtenidos, se puede concluir que los accidentes con fugas tóxicas, exceptuando algunos casos, no implican porcentajes de muertes muy elevados, pero sí se observa que, en su mayoría, las personas experimentan lesiones (las bases de datos no indican explícitamente si éstas fueron: dentro o fuera de planta, leves o severas, reversibles o irreversibles). El valor más alto (tanto en número de muertos como en lesiones) se da en la categoría de afectación de 1001 – 10.000 individuos, correspondiente al desastre de Bhopal (1984, India), ya mencionado con anterioridad, considerado como el peor accidente que se ha experimentado en una planta química hasta la fecha.

Por otra parte, las bases de datos también contienen información sobre las personas evacuadas como consecuencia del accidente. Únicamente en el 36% de todos los accidentes (525) se indica el número de personas evacuadas (incluido 0). La distribución se muestra en la Figura 9:



**Figura 9.** Accidentes según el número de personas evacuadas

Los dos registros con número de evacuados más altos (>50.000) corresponden a: el descarrilamiento de un tren en Wisconsin (USA, 1992), que provocó el vertido de, aproximadamente, 80 toneladas de benceno (más de 80.000 personas fueron evacuadas) y al conocido milagro de Mississauga (Canadá, 1979), cuando un tren de carga que transportaba productos químicos y explosivos descarriló, produciendo sucesivas explosiones y la ruptura de un tanque de cloro, produciéndose la fuga tóxica de la nube de gas (más de 215.000 personas fueron evacuadas). De todos los registros con datos de evacuación conocidos, en un 17% de los casos nadie fue evacuado, mientras que el porcentaje más grande de entradas se da entre 101 y 1.000 evacuados (23%), seguido de 1 a 5 evacuados (20%). El

hecho de que en el 83% de los casos hubiese evacuaciones destaca la importancia de los servicios de emergencia y su planificación en este tipo de accidentes.

#### **2.3.11. Aspectos destacables**

Del análisis histórico previo se destacan una serie de puntos. La mayor parte de los accidentes registrados que involucran el fenómeno de fuga tóxica se concentran en los últimos 40 años y afectan a zonas urbanas en las que, presumiblemente, se tiene una mayor cantidad de individuos por superficie. Por su parte, el factor humano es la causa más frecuente en este tipo de incidentes, seguida muy de cerca por el fallo mecánico, sobre todo en plantas de proceso y en la operación de transporte. El amoníaco y el cloro son las dos sustancias tóxicas que más veces han sido registradas en sucesos de este tipo. Los accidentes con fugas tóxicas, según el estudio realizado, suelen presentar porcentajes más altos de personas heridas que de fallecidas, exceptuando determinados casos. Por último, el elevado número de registros en los que se tiene constancia haber realizado evacuaciones pone de manifiesto la importancia de una correcta planificación por parte de las brigadas de emergencia.

### **3. Selección de casos de estudio**

Este capítulo está destinado a seleccionar una serie de casos de estudio relativos a los accidentes con fugas tóxicas tratados en el análisis histórico previo, de forma que puedan ser modelizados posteriormente mediante el software ALOHA (convenientemente explicado en el apartado 4.2.2 y Anexo A1) para determinar el riesgo potencial asociado y la población vulnerable, pudiendo así evaluar la idoneidad de las medidas de protección civil llevadas a cabo en este tipo de escenarios. El criterio de selección se ha hecho de acuerdo a una serie de factores, tratando de descartar aquellos accidentes con información insuficiente. Primeramente se han buscado accidentes donde estén claramente definidos aspectos claves como la sustancia involucrada, el término fuente (todo aquello que dé valor cuantitativo a la fuga: tipo de contenedor, masa de sustancia involucrada, dimensiones del depósito, etc.), condiciones meteorológicas (tienen un papel muy importante en la dispersión de la nube tóxica), el número de personas afectadas (muertes, heridos y evacuados) y, si es posible, ubicación de los individuos afectados (útil para definir las zonas de alerta e intervención). No se busca, por tanto, realizar una selección de accidentes con grandes daños económicos, sino un recopilatorio de accidentes centrados, particularmente, en consecuencias graves sobre personas, ya que, por normal general, éste es el elemento principal de riesgo. La mayoría de los casos recopilados a continuación, bajo los criterios citados, involucran cloro y amoníaco. Esto no sorprende, ya que estas dos sustancias conforman el binomio más importante en fugas tóxicas, tal y como pudo observarse en el análisis histórico. Al final del capítulo se muestra una tabla resumen con todos los casos tratados.

#### **3.1. Fuga de cloro producida en Baton Rouge, Louisiana (1976)**

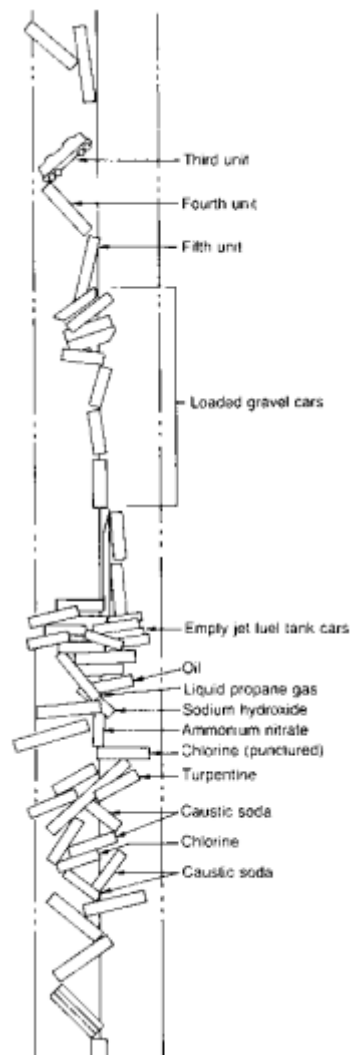
RES: Se cree que una explosión provocó el desplazamiento de un tanque que contenía cloro y lo precipitó hacia un objeto punzante provocando la fuga de, aproximadamente, 90 ton de cloro. No se registraron muertes, pero se trata de un accidente interesante dada la gran cantidad de cloro vertido a la atmosfera, convirtiéndose en uno de los sucesos más importantes en relación al tonelaje fugado dentro de las emisiones tóxicas que involucran esta sustancia (Medel 2006).

El suceso ocurría el 10 de diciembre de 1976, en Baton Rouge, Louisiana, concretamente en un depósito horizontal de almacenamiento de cloro de 125 ft de longitud x 11 ft de diámetro. Dicho recipiente descansaba sobre unos soportes cuando una explosión interna provocó que éste cayese y fuese perforado por un objeto puntiagudo, causando la fuga de 90,7 ton de cloro durante un periodo de 5,6 horas. El vertido resultó en una tremenda nube de gas que se desplazó a través de 42 millas, sobrevolando el río Mississippi. El resultado fueron 10.000 personas evacuadas y 3 personas que padecieron de irritaciones leves. Por suerte, la nube se desplazó por regiones escasamente pobladas, por lo que no hubo ninguna muerte registrada (Lees, Frank 1996).

### 3.2. Fuga de cloro en Youngstown, Florida (1978)

RES: Liberación de cloro debido al descarrilamiento de un vagón de ferrocarril. El resultado fue 7 personas muertas. Se dispone de información relevante en relación a las dimensiones de la nube de gas formada.

El accidente tuvo lugar durante la noche del 26 de febrero de 1978, alrededor de la 1:55 a.m., cuando un tren de carga descarriló cerca de Youngstown, Florida. Dicho tren transportaba cloro líquido cuando se produjo el siniestro al impactar con otro ferrocarril, produciéndose el descarrilamiento de aproximadamente 43 de los 115 vagones. En la Figura 10 se muestra un esquema de la ubicación aproximada de los vagones tras el accidente.



**Figura 10.** Posición aproximada de los vagones de tren después del descarrilamiento (Lees, Frank P. 1996)

El resultado fue la formación de una nube de cloro que se desplazó a través de la autopista estatal 231, situada paralelamente al ferrocarril a una distancia aproximada de 300 ft. Las condiciones ambientales eran de unos 50-55 °F y corría un viento ligero del oeste de unos 2-3 nudos. La región ya era bastante propensa a formación de neblinas (además era de noche), así que varios conductores que circulaban por la carretera fueron incapaces de distinguir la nube y entraron en ella. 7 motoristas murieron intentando escapar y un octavo condujo a través de la nube para acabar muriendo a pocos metros (Lees 2012).

Diversos miembros de la tripulación del tren intentaron notificar a los residentes y autoridades locales sobre lo acontecido, sin embargo, fue imposible contactar con la instalación base, ya que ésta no estaba abierta después de medianoche. Ante esta situación, se desplazaron hacia la autopista y alertaron a la gente sobre la gravedad de la situación, consiguiendo detener a un sheriff adjunto, el cual pudo solicitar ayuda por radio e iniciar los procedimientos de emergencia. Sin embargo, ninguna de las llamadas se recibió hasta después de las 2:24 a.m., casi 30 minutos después de que la sustancia fuese liberada al ambiente. Gracias a este acto heroico por parte de los miembros de la tripulación, poniendo en peligro sus vidas a causa de la exposición repetida a la nube de gas, el servicio de emergencia evacuó a las personas, primero en un radio de 5 millas y luego en un radio de 10 millas. (Brief 2002) («Safety Recommendation R-78-057»). A las 9:00 a.m. una vista aérea reveló una nube de gas de 3 millas de ancho, 4 millas de largo y una altura máxima de 1.000 ft. El accidente acabó con 8 personas muertas y unas 205 hospitalizadas, 50 de ellas con lesiones graves. 2.500 personas fueron evacuadas en un área de 100 km<sup>2</sup>. Si el viento hubiese soplado en una dirección más desfavorable, la ciudad entera de Youngstown habría quedado envuelta en la nube y las consecuencias podrían haber sido fatales.

### **3.3. Fuga de cloro cerca de Montana, México (1981)**

RES: Otra fuga de cloro, esta vez con consecuencias más letales sobre personas que las dos anteriores, ocurrió cuando se produjo el descarrilamiento de un tren que resultó en la ruptura de dos tanques de cloro de 55 ton. La nube de gas formada se extendió a través de un valle estrecho y provocó 17 muertes.

El 1 de agosto de 1981, a las 17:52, se produjo el descarrilamiento del tren resultando en una liberación masiva de cloro cerca de Montana, México. Las condiciones climáticas hacían que soplar un viento cálido desde el valle hacia el pueblo. El tren estaba formado por 38 vagones, 32 de los cuales contenían cloro líquido. Un fallo en los frenos cuando circulaba a 80 km/h por un valle empinado y tortuoso, a 350 m de la estación de Montana, provocó el accidente. De esos 32 vagones, 28 se vieron afectados de forma más o menos grave. Entre el siniestro se identificó un vagón sin uno de los extremos, el cual fue propulsado una distancia aproximada de 2.000 m, otro completamente partido por la mitad y un

tercero con un agujero de 0,5 m de diámetro. Aproximadamente 100 ton de cloro fueron vertidas durante los primeros minutos y, en total, se estima que unas 300-350 ton se extendieron a través de un área de 40 hectáreas. La zona con mayor concentración de tóxico pareció darse en una región de 1.000 m de largo x 40 m de ancho. La población de Montana era de unas 400 personas, pero también había un tren de pasajeros con aproximadamente 300 personas en la estación (Lees 2012). En total murieron 17 personas, 4 de las cuales se encontraban en el furgón de cola y 13 debido al gas. Cerca de 1.000 individuos fueron recibidos en el hospital, 5.000 personas evacuadas (Mahindru 2004).

### 3.4. Fuga de cloro en La Barre, Louisiana (1961)

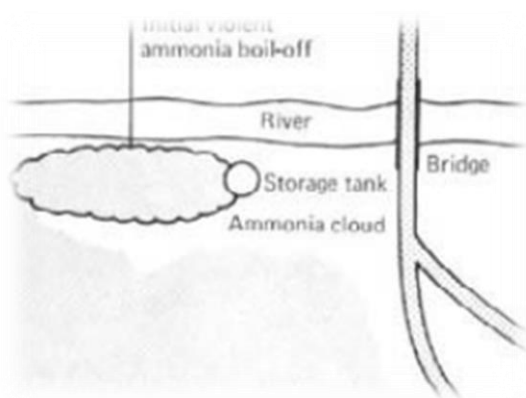
RES: El accidente tuvo lugar en La Barre, Louisiana, a causa del descarrilamiento de un tren que transportaba cloro. La selección de este caso de estudio es interesante desde el punto de vista de la importancia del confinamiento y la protección pasiva que tienen los edificios, ya que en las proximidades de una casa situada a 50 yardas del siniestro un niño murió, mientras que un bebé que se encontraba dentro de la vivienda consiguió sobrevivir.

Transcurrían aproximadamente las 8:15 a.m. del 31 de enero de 1961 cuando se derramaron unos 6.000 US gal (30 ton) de cloro de un vagón que había descarrilado en la comunidad de La Barre, Louisiana. El accidente formó una nube de gas, en su mayor parte a ras de suelo, aunque en determinadas zonas a 80-90 ft de altura, que se extendió sobre un área de 6 millas<sup>2</sup>. Posteriormente, sobre las 11:15 a.m., se tomaron muestras de las concentraciones de tóxico (10 ppm) en un área de unos 200 m de longitud en una carretera paralela al ferrocarril. A las 3:00 p.m. se midió la concentración a 75 yardas del incidente, siendo de 400 ppm. Hubo un muerto y alrededor de 100 personas fueron tratadas debido a las lesiones causadas por la exposición al cloro. Por su parte, 1.000 personas fueron evacuadas (Lees, Frank 1996). Lo especialmente interesante de este caso es que un niño de 11 meses de edad que vivía en una casa situada a unas 50 yardas del punto de fuga, a causa de la inhalación de cloro, empezó a jadear y un miembro de la familia, asustado por la situación que estaba viviendo el niño, lo llevó al exterior, donde la concentración de cloro era todavía más alta que en el interior. El niño murió a las pocas horas. Sin embargo, un bebé de 2 meses que permaneció en la casa consiguió salir con vida (Blanc 2007) (Roy y Durel 1962).

### 3.5. Fuga de amoníaco en Blair, Nebraska (1970)

RES: Una fuga de 160 ton de amoníaco de un tanque de almacenamiento en Blair, Nebraska dio lugar a un accidente del que no se registraron muertos (American Institute of Chemical Engineers. 1970).

El 16 de noviembre del año 1970, un operario de la empresa Gulf Oil en Blair, Nebraska, por error, sobrepasó el límite de capacidad de un tanque de almacenamiento de amoníaco anhidro refrigerado de 40.000 ton. La consecuencia de este error en el procedimiento fue el desbordamiento del tanque, produciéndose la liberación de 160 ton de amoníaco. Por suerte, no se identificaron muertos o lesiones graves. Parece ser que el motivo que provocó el fallo del operador fue que la tabla de niveles no indicaba correctamente la posición de las tuberías de desbordamiento. Por otro lado, el sistema de alarma de alto nivel no funcionaba adecuadamente, así que el nivel de líquido fue subiendo hasta alcanzar la parte superior del depósito, momento en el que la válvula se abrió y se formó la nube de amoníaco. Durante un período de dos horas y media se estuvo liberando amoníaco a la atmosfera. A causa del fenómeno de inversión térmica y a la poca presencia de viento, las condiciones climáticas no favorecieron la dispersión de la nube tóxica, aunque ésta alcanzó un grosor de 8-30 ft y se extendió hasta una distancia de más de 9.000 ft respecto al tanque, cubriendo un área aproximada de 3,6 km<sup>2</sup> (Kaiser y Griffiths 1982). En la Figura 11 se muestra una distribución aproximada de la nube poco después de la fuga (Lees, Frank 1996) y en la Figura 12 una vista aérea. El resultado fue 3 bomberos intoxicados, una fábrica y una escuela evacuadas, varios animales afectados (entre ellos 2 perros muertos) y 370 m<sup>2</sup> de hierba quemada.



**Figura 11.** Esquema aéreo de la nube de amoníaco poco después del derrame (Lees, Frank P. 1996)



**Figura 12.** Vista aérea de la nube de amoníaco cubriendo todo el primer plano (Lees, Frank P. 1996)

### 3.6. Fuga de amoníaco en Potchefstroom, Sudáfrica (1973)

RES: El fallo en un tanque de almacenamiento que contenía amoníaco provocó la fuga de 39 ton, causando la muerte de 18 personas. Se trata de unos de los peores accidentes con información disponible que involucran esta sustancia.

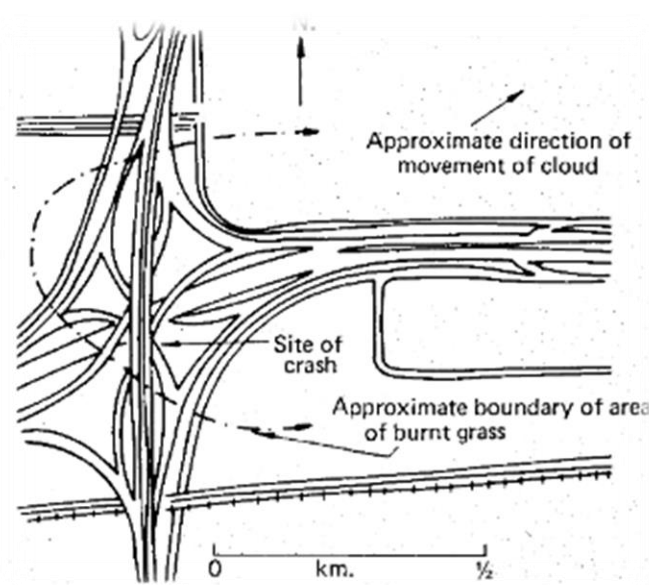
El 13 de julio de 1973, a las 4:15 p.m., tuvo lugar un fallo repentino durante la descarga de un depósito que almacenaba 50 ton de amoníaco anhidro bajo presión en una fábrica de fertilizantes de Potchefstroom, produciéndose la fuga de 39 ton de amoníaco. El resultado fue una nube de gas de 150 m de diámetro y 20 m de profundidad. Se descartó que el evento desencadenante del fallo fuese la sobrepresión o un exceso de temperatura. Según un informe detallado sobre el examen ultrasónico que se realizó en el tanque se revelaron numerosas fisuras superficiales (Lees 2012). Al inicio del accidente el viento era leve, pero minutos después surgió una ligera brisa que arrastró la nube hacia un municipio situado a unos 200 m al noreste. La nube, de aproximadamente 300 m de ancho, se extendió una distancia de 450 m. En el momento del suceso había 350 personas trabajando en la planta, 30 de las cuales estaban a unos 70 m del depósito. Uno de los empleados, situado a una distancia del tanque de aproximadamente 45 m, murió instantáneamente por la explosión y 8 más, situados dentro de un radio de 100 m, murieron al intentar escapar. Días después se registró la muerte de otras 3 personas por la exposición a la nube. Fuera de la fábrica murieron un total de 6 personas (4 de ellas de inmediato y 2 unos días después). En total se registraron 18 fallecidos y 65 personas intoxicadas (Griffiths y Kaiser 1982).



### 3.7. Fuga de amoníaco en Houston, Texas (1976)

RES: Un camión cisterna que transportaba amoníaco se estrelló en la autopista sudoeste de Houston, liberando 19 toneladas de dicha sustancia. Fue el peor accidente de la historia ocurrido en Houston. Se registró la muerte de 6 personas.

El accidente tenía lugar sobre las 10:45 a.m. del 11 de mayo de 1976. Era una mañana soleada y el viento tenía una velocidad de unas 7 milla/h. Un camión con un semirremolque atravesó un puente sobre la carretera interestatal I-610 y cayó desde unos 15 ft sobre la autopista sudoeste, US 59. El tráfico era bastante denso. Tras el impacto, el tanque que contenía 19 ton de amoníaco líquido anhidro, estalló. Fruto del accidente se formó una nube con una altura inicial de más o menos 30 m, que posteriormente alcanzaba una longitud de 600 m y un ancho de 300 m. El amoníaco tardó unos 5 min en vaporizarse y dispersarse. Las consecuencias fueron 6 personas muertas y 178 individuos con lesiones más o menos graves. Algunas de las personas que se vieron afectadas conducían vehículos a una distancia de 300 m del accidente (Griffiths y Kaiser 1982) (Lees 2012). Además, tal y como se muestra en la Figura 13, se quemó parte de la hierba próxima al lugar del accidente. Esto último es un ejemplo claro de cómo el amoníaco presurizado que transportaba el camión, una vez liberado, forma parte de una mezcla más densa que el aire y deja ese tipo de escenarios a ras de suelo.



**Figura 13.** Impresión aérea del área de hierba quemada (Kaiser y Griffiths 1982)

### 3.8. Fuga de amoníaco en Jonava, Lituania (1989)

RES: Un tanque de almacenamiento que contenía 7.000 ton de amoníaco falló. Se estima que unas 1.400 ton de amoníaco se evaporaron y que otras 700 ton de amoníaco y humos nitrosos participaron en la nube de fuego tóxica. La pluma alcanzó una extensión de unos 35 km y afectó un área de 400 km<sup>2</sup>. Fallecieron 7 personas (Lees 2012).

El suceso se produjo el 20 de marzo de 1989. En una planta situada a 12 km de Jonava, una ciudad de aproximadamente 40.000 habitantes, un tanque de 29 m de diámetro y 20 m de altura que tenía una capacidad de 10.000 m<sup>3</sup> contenía, en ese momento, 7.000 ton de amoníaco líquido a una temperatura de -33 °C. La capacidad de cada una de las dos válvulas de alivio de presión era de 4.200 m<sup>3</sup>/h. En las proximidades había dos tiendas de fertilizantes, las cuales almacenaban 15.000 y 20.000 ton, respectivamente, así como 20.000 ton de nitrato de amonio (Orvar Andersson 1989). A causa de un error en el procedimiento se transfirieron al tanque presurizado 14 ton de amoníaco a 10 °C. Como consecuencia, la mayor presión de vapor del líquido más caliente causó un aumento repentino de la presión de la atmosfera gaseosa en el tanque y provocó la explosión y ruptura del tanque. Acto seguido se formaron, en determinados lugares, charcos de amoníaco de hasta 70 cm de profundidad. Los vapores que sobrevolaban el ambiente se incendiaron engullendo toda la zona en llamas. Después de 12 horas, y favorecido por la acción de un viento débil del sur (< 2m/s a una altura de 10 m), el amoníaco de los charcos se había evaporado por completo (alrededor de 1.400 ton) (Kukkonen et al. 1993). La gran nube tóxica de amoníaco y vapores nitrosos (NO<sub>x</sub>) se extendió 35 km, cubriendo un área de 400 km<sup>2</sup>. La altura de la nube era de 100, 400 y 800 m a distancias de 5, 10 y 20 km, respectivamente. Unas 32.000 personas fueron evacuadas de las zonas de alto riesgo por las autoridades locales una vez que la concentración de amoníaco en aire había superado los 10 mg/m<sup>3</sup>. El balance de muertos fue 7 individuos. Además, 57 personas resultaron heridas. Según informes, la concentración de amoníaco, dentro de un radio de 3 km, en ningún momento excedió los 200 mg/m<sup>3</sup>. Los niveles encontrados a distancias de 10-15 km fueron entre 20 y 40 mg/m<sup>3</sup>. Estos niveles relativamente bajos podrían explicarse, en parte, por la ignición ocurrida en planta del amoníaco vapor. Por su parte, la concentración de óxidos nitrosos que se podría haber alcanzado cerca de la zona de almacenamiento estaría entorno a los 25 mg/m<sup>3</sup> (Concerned 2007).

### 3.9. Fuga de amoníaco en McPherson, Kansas (1973)

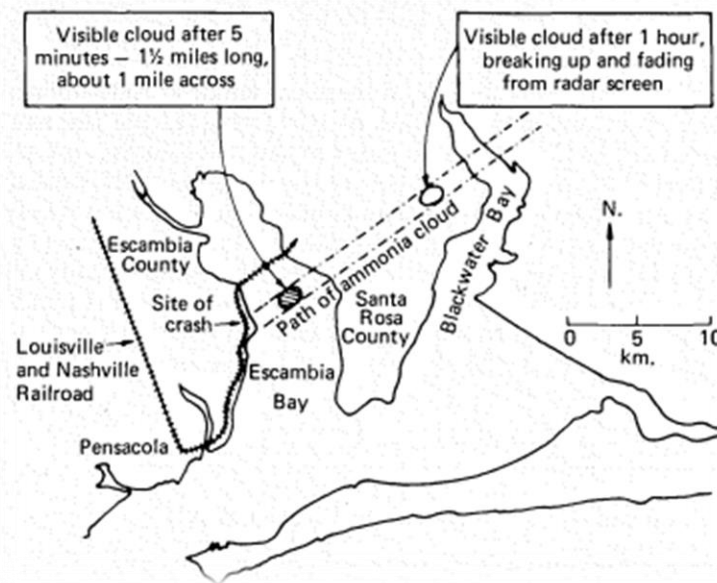
RES: Una gran liberación de tóxico con consecuencias no fatales sobre las personas ocurrió en una tubería que transportaba 2.500 t/d de amoníaco en McPherson, Kansas, cuando se produjo el escape de 230 ton de dicha sustancia (Griffiths y Kaiser 1982).

El 6 de diciembre de 1973, sobre las 4:30 a.m., se produjo una fuga en el sistema de tuberías de la estación de bombeo de Conway cerca de McPherson, Kansas. Justo antes de la fuga, la estación de bombeo había estado sin energía durante 18 horas a causa de una fuerte tormenta, y aunque la energía se recuperó parcialmente sobre las 3:00 a.m., la tubería estuvo en mantenimiento y no se puso en marcha hasta las 4:12 a.m. Fue entonces cuando una de las válvulas de bloqueo no se abrió y la línea de transporte alcanzó una sobrepresión que provocó un estallido en unas de las zonas de la tubería que estaba más deteriorada. Como consecuencia, se produjo la fuga de unas 230 ton de amoníaco anhidro durante un periodo de media hora. Una nube densa y claramente visible se desplazó sobre la autopista 56, situada unos 1.000 ft al sur. La pluma permaneció estrecha debido a unas condiciones meteorológicas muy estables y a una velocidad del viento entorno a las 5-10 millas/h. Durante aproximadamente tres horas y media y a 8 millas del origen del accidente se detectaron síntomas de irritación y olor. No obstante, el incidente no causó consecuencias graves, en parte porque muchos habitantes se habían mudado a ciudades cercanas debido a los continuos fallos eléctricos causados por las tormentas. Únicamente hubo 2 heridos. También hubo personas situadas en viviendas a  $\frac{3}{4}$  millas al sur de la fuga que fueron evacuadas por precaución (Lees 2012).

### **3.10. Fuga amoníaco en Pensacola, Florida (1977)**

RES: El descarrilamiento de un tren provocó la perforación de unos tanques que transportaban amoníaco anhidro, produciéndose la liberación del tóxico a la atmosfera. Como consecuencias, 2 personas murieron y 46 resultaron heridas (Lees 2012).

Sobre la 6:06 p.m. del 9 de noviembre de 1977 se producía el descarrilamiento de un tren que se desplazaba a 35 mph y se encontraba a 9 millas al sur de Goulding Yard, entrando en la curva 6°04' de Pensacola, Florida. El accidente provocó la fuga de aproximadamente 40 ton de amoníaco, las cuales vaporizaron rápidamente. En relación a las condiciones meteorológicas, en el momento del suceso estaba bastante oscuro, con una visibilidad de aproximadamente 5 millas y una temperatura alrededor de los 68 °F. El cielo estaba nublado, llovía ligeramente y el viento soplaba de suroeste a 3,5 mph (en las siguientes 6 horas cambió a sureste, con una velocidad media de 12 mph) (NTSB-RAR-78-4 1978). Pasados 4 minutos desde el momento del suceso, un controlador de tránsito aéreo en un aeropuerto cercano de Pensacola, observó la nube de amoníaco en el radar, la cual parecía tener aproximadamente 1 milla de diámetro y unos 125 ft de altura. Durante una hora se pudo observar de forma clara la nube, tiempo durante el cual se desplazó 9 millas a ras de suelo, siguiendo el camino indicado en la Figura 14. Las consecuencias fueron 2 personas muertas y 46 heridas. Alrededor de 1.000 individuos fueron evacuados (500 de ellos estaban situados dentro de un radio de 3.500 ft) (Kaiser y Griffiths 1982).



**Figura 14.** Desplazamiento de la nube de amoníaco (Kaiser y Griffiths 1982)

### 3.11. Fuga de fosgeno en Hamburgo, Alemania (1928)

RES: A causa de un fallo en un depósito a presión se produjo una fuga de fosgeno que provocó que, aproximadamente, 300 personas quedasen expuestas al gas y como resultado se registrasen 10 muertes.

El 28 de mayo de 1928 se producía la explosión de un tanque que almacenaba fosgeno en la fábrica de Stolzenburg, en el Hofe-Kanal, cerca de la zona portuaria de Hamburgo. El viento tenía dirección norte, pero luego cambio hacia el sureste. A 5 millas del accidente, el gas se sintió de forma intensa. Muchas personas situadas a 6 y 11 millas también se vieron afectadas por la nube. Algunas fuentes hablan de una liberación aproximada de 300 ft<sup>3</sup> de gas (Lees, Frank P. 1996) (esto correspondería a unas 11-12 ton). En total, 300 personas recibieron ayuda hospitalaria, de las cuales 10 fallecieron. De los 195 individuos admitidos en el primer día, 17 presentaban lesiones muy graves (7 murieron), 15 lesiones moderadas y los demás únicamente se vieron ligeramente afectados (Hegler 1928).

### 3.12. Fuga de cloro en Mississauga, Toronto (1979)

RES: El descarrilamiento de un tren resultó en una serie de explosiones y una fuga de cloro. Es uno de los accidentes con información disponible más importantes en cuanto al despliegue de las brigadas de emergencia, dado que 215.000 personas fueron evacuadas.

El sábado 10 de noviembre de 1979, sobre las 23:52, en Mississauga, Toronto, tenía lugar el descarrilamiento de un tren de carga, dando lugar a incendios, varias explosiones (una justo unos minutos después del accidente, seguida de otra a las 00:10 y dos BLEVEs en unos tanques que almacenaban propano, la primera a las 00:15 y la segunda a las 00:24) y la liberación de una nube de cloro que ponía a la región en estado de emergencia durante 11 días. Algunas piezas del tanque se proyectaron a distancias de 700 m. Se cree que el accidente se produjo a causa de un vagón con un eje mal lubricado, el cual se separó del resto e hizo que los vagones descarrilasen. El tren estaba constituido por 25 vagones, 19 de los cuales contenían materiales peligrosos, en una mezcla de materiales inflamables y tóxicos, entre los que se incluían propano (742 ton), tolueno (67 ton), estireno (225 ton), sosa cáustica (366 ton) y cloro (únicamente uno de los vagones almacenaba cloro líquido en una cantidad de 90 ton). Tras el accidente, el contenedor de cloro perdió parte de su aislamiento y se produjo un agujero de 3 ft de diámetro (Lane y Thomson 1981). Aunque inicialmente los servicios de emergencia desconocían qué transportaba el tren, el fuerte olor a cloro en las inmediaciones hizo que, a las 3:00, se tomase la decisión de evacuar a 215.000 personas de poblaciones circundantes. A las 9:00 del martes 13 de noviembre se realizó el primer intento para tapar el orificio del tanque de cloro, pero no tuvo éxito. Fue en el segundo intento (éste sí exitoso) cuando el tanque se vació, recuperando 18 ton de cloro. Por tanto, aunque se desconoce la tasa de fuga, parece que aproximadamente se liberaron 70 de las 90 ton de cloro. Durante la tarde del martes, 143.000 personas pudieron regresar a sus hogares (el resto no lo hizo hasta pasados 6 días). 14 personas resultaron heridas por la inhalación de gases nocivos, 8 de las cuales eran bomberos (Lees, Frank P. 1996) (Honourable et al. 1981).

**Tabla 8.** Resumen de los aspectos más destacables de los casos de estudio seleccionados (Nota<sup>1</sup> M: personas muertas, L: personas lesionadas, E: personas evacuadas)

Caso	Sustancia	Término Fuente	Condición meteorológica a especificada	Evolución de la nube	Consecuencias sobre personas¹	Distancias de afectación y/o evacuación
#1	Cloro	90 ton	-	Desplazamiento a través de 42 millas	Sí (L: 3; E: 10.000)	-
#2	Cloro	-	Temperatura	Dimensiones de la nube	Sí (M: 8; L: 205; E: 2.500)	Sí
			Viento			
#3	Cloro	100 ton	Viento	Se extiende a través de 40 hectáreas	Sí (M: 17; L: 1.000; E: 5.000)	-
#4	Cloro	30 ton	-	Se conoce extensión de la nube	Sí (M: 1; L: 100; E: 1.000)	Confinamiento o de un niño en vivienda a 50 yardas
#5	Amoníaco	160 ton	Poco viento	Grosor de la nube	Sí (L: 3)	-
			Inversión térmica	Se extiende a más de 9.000 ft		
				Cubre un área de 3,6 km2		
#6	Amoníaco	39 ton	Viento leve	Dimensiones de la nube	Sí (M: 18; L: 65)	Sí
				Se extiende a una distancia de 450 m		
#7	Amoníaco	19 ton	Sí	Dimensiones de la nube	Sí (M: 6; L: 178)	Sí
#8	Amoníaco	1.400 ton	Viento	Dimensión y extensión de la nube	Sí (M: 7; L: 57; E: 32.000)	-
				Área cubierta		
				Altura a determinadas distancias		
#9	Amoníaco	230 ton	Condiciones estables	Desplazamiento de la nube por autopista situada a 1.000 ft	Sí (L: 2)	A 8 millas del accidente se detecta irritación y olor
			Viento			
#10	Amoníaco	40 ton	Temperatura	Dimensiones de la nube	Sí (M: 2; L: 46; E: 1.000)	Conocido radio de evacuación
			Viento	Desplazamiento de 9 millas a ras de suelo		
			Día lluvioso y nublado			
#11	Fosgeno	11-12 ton	Viento	-	Sí (M: 10; L: 300)	Personas afectadas a 6 y 11 millas
#12	Cloro	70 ton	-	-	Sí (E: 215000)	-

## 4. Metodologías de zonificación de emergencia

### 4.1. Marco legal

Los accidentes de tipo químico relativos a fugas tóxicas se contemplan dentro del Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio. En dicho decreto se establece la necesidad de revisión de la Directriz Básica (2003) para la elaboración y homologación de los planes especiales del sector químico, en busca de una correcta planificación de la protección civil con el objetivo de prevenir accidentes graves y limitar sus consecuencias sobre personas, medio ambiente y bienes. Este proyecto pretende, una vez realizado el análisis histórico y seleccionados los casos de estudio de interés, realizar un análisis de las consecuencias de estos accidentes provocados por la fuga o vertido incontrolado de las sustancias peligrosas que se contemplan en la *Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves*, con el objetivo de determinar aspectos relativos a la zonificación de riesgos, como es el establecimiento de unas distancias de seguridad adecuadas para cada situación que sirvan de base para justificar las medidas de planificación adoptadas en accidentes futuros. Para ello se han seguido parte de las metodologías adoptadas en la guía técnica elaborada por el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia («Guía técnica de Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II])»).).

### 4.2. Metodología de protección civil aplicada en España

La característica esencial de todas las sustancias tóxicas es que para producir consecuencias deben difundirse a través de un medio. La liberación incontrolada de estos contaminantes conlleva riesgos asociados, especialmente sobre personas y bienes. La metodología contempla en la Directriz Básica (2003) un análisis de vulnerabilidad de acuerdo a las zonas que han sido potencialmente afectadas por los fenómenos peligrosos. Este análisis de vulnerabilidad se fundamenta en base a las distancias a las que determinadas variables físico-químicas representativas de los fenómenos peligrosos alcanzan unos valores umbral. Dentro de los fenómenos químicos peligrosos, en las que se incluyen las fugas tóxicas, la Directriz Básica define como variable representativa del daño inmediato originado por la liberación de productos tóxicos, la concentración de tóxico o dosis (D), expresada como una combinación factorial de la siguiente manera:

$$D = C_{m\acute{a}x}^n \cdot t_{exp} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde  $C_{\text{máx}}$  es la concentración máxima de la sustancia en el aire,  $t_{\text{exp}}$  el tiempo de exposición y  $n$  un exponente que depende de la sustancia. El término dosis da una idea de que para cada sustancia hay una cierta cantidad que no produce ningún efecto, pero al aumentar ésta (ya sea por una concentración de tóxico mayor en aire o por un tiempo de exposición más prolongado) se producen respuestas biológicas en los individuos con efectos adversos crecientes. A partir del concepto de dosis, si es conocido el valor  $n$  para una determinada sustancia, se puede determinar todas las combinaciones concentración – tiempo que producirían un mismo efecto. Por otra parte, en la Directriz citada, se proponen una serie de valores límite en aire y las consideraciones necesarias para emplear los índices correspondientes para tiempos de paso de las nubes diferentes a los periodos de referencia establecidos en su definición. Los índices propuestos son: AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*), ERPG (*Emergency Response Planning Guidelines*) y TEEL (*Temporary Emergency Exposure Limits*). La elección de estos índices, y no otros, se fundamenta, sobre todo, en que los efectos provocados por la exposición están claramente definidos, presentan un mayor reconocimiento a nivel internacional y tienen campos de aplicación más amplios. Además, están definidos para varios periodos de exposición (posibilidad de interpolación y extrapolación) y contemplan una mayor cantidad de sustancias. A continuación se definen los índices en orden decreciente de preferencia de acuerdo a la consideración que marca dicha Directriz:

**Índice AEGL:** propuesto inicialmente por la *Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos de América*. Dispone de tres niveles de daño (1, 2 y 3), considerando para cada nivel los periodos de referencia siguientes: 30 minutos, 1, 4 y 8 horas y, en determinados casos, 10 minutos. Representan el umbral límite de exposición para la población y son aplicables a emergencias para los periodos de exposición anteriormente citados. Los tres niveles de daños son:

AEGL-1: concentración a/o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, puede experimentar una incomodidad notable. Concentraciones por debajo del AEGL-1 representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve.

AEGL-2: concentración a/o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, puede experimentar efectos a largo plazo serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar. Concentraciones por debajo del AEGL-2 pero por encima del AEGL-1 representan niveles de exposición que pueden causar notable malestar.

AEGL-3: es la concentración a/o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, podría experimentar efectos amenazantes para la vida o la muerte. Concentraciones por debajo de AEGL-3 pero por encima de



AEGL-2 representan niveles de exposición que pueden causar efectos a largo plazo, serios o irreversibles o impedir la capacidad de escapar.

**Índice ERPG:** publicado por la *Asociación de Higiene Industrial Americana*. Cuando la sustancia no tiene definido un AEGL, se recomienda utilizar el ERPG. Este índice sigue estando definido para tres niveles de daño, pero para caso presenta un único periodo de referencia (60 min). Pretenden estimar los rangos de concentración en los que se puede prever razonablemente efectos adversos observables como consecuencia de la exposición a una sustancia determinada. Los tres niveles de daño se definen como:

ERPG-1: es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora experimentando sólo efectos adversos ligeros y transitorios o percibiendo un olor claramente definido.

ERPG-2: es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora sin experimentar o desarrollar efectos serios o irreversibles o síntomas que pudieran impedir la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.

ERPG-3: es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora sin experimentar o desarrollar efectos que amenacen su vida. No obstante, pueden sufrir efectos serios o irreversibles y síntomas que impidan la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.

**Índice TEEL:** por último, recomendados en tercer lugar y desarrollados por el *Departamento de Energía de los Estados Unidos*, se tratan de valores límite con cuatro niveles de daño (0, 1, 2 y 3) y definidos para un único tiempo de exposición (en este caso, 15 min). Los cuatro niveles de daño son:

TEEL-0: concentración umbral por debajo de la cual la mayor parte de las personas no experimentarían efectos apreciables sobre la salud.

TEEL-1: máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos experimentarían efectos ligeros y transitorios sobre la salud o percibirían un olor claramente definido.

TEEL-2: máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos podrían estar expuestos sin experimentar o desarrollar efectos sobre la salud serios o irreversibles, o síntomas que pudieran impedir la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.

TEEL-3: máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos podrían estar expuestos sin experimentar o desarrollar efectos amenazantes para la vida. Sin embargo,

pueden sufrir efectos serios o irreversibles y síntomas que impidan la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.

Observando minuciosamente la definición de cada índice se puede ver que presentan definiciones comunes para los mismos niveles de daño, por lo que es posible establecer un criterio de unificación y definir unas zonas de planificación acordes, Tabla 9. De hecho, en la *Guía Técnica de Zonas de Planificación para Accidentes Graves de Tipo Tóxico* ya se realiza esta discriminación y se concluye que pueden establecerse las zonas de planificación en base a este criterio, ya que para cualquier nivel de daño, siempre que éste sea igual entre índices, los efectos esperados son los mismos.

**Tabla 9.** Unificación de niveles y efectos para todos los índices citados

Nivel de daño	Descripción de efectos esperados de los índices AEGLs, ERPGs y TEELs	
Superior a 3 3 → Superior a 2 2 →	Efectos amenazantes para la vida o la muerte  Efectos serios o irreversibles (malestar notable)	ZONA DE INTERVENCIÓN
Superior a 1 1 →	Efectos ligeros o transitorios (incomodidad notable)	ZONA DE ALERTA
Inferior a 1 (sólo TEELs)	La mayor parte de los individuos no experimentarían efectos apreciables sobre la salud (olor, sabor, irritación leve)	

El establecimiento de la zona de intervención y alerta se hace respetando la definición que da la Directriz Básica sobre las zonas de planificación, de forma que no se contradigan las tipologías de éstas, y siguiendo el criterio establecido en la guía técnica anteriormente citada relativa a dispersiones tóxicas.

A continuación se puntualizan algunas consideraciones que fija la Directriz y que deben tenerse en cuenta para la utilización de los índices:

- Todos los índices representan concentraciones máximas (o valores techo independientes del tiempo de exposición) que no deben ser sobrepasadas en ningún momento durante el correspondiente tiempo de referencia. Esto es así porque los efectos de dichos índices han sido determinados en condiciones en las que la concentración permanece constante durante el respectivo periodo de referencia, por lo que sólo es posible garantizar niveles de daño inferior (o como mucho, iguales) sobre la población cuando las concentraciones y tiempos de exposición también sean iguales o inferiores a los de dicho índice.
- Los índices AEGL se puede interpolar para tiempos de paso de nubes ( $t_{exp}$ ) distintos a los de referencia. Para ello se determina la dosis (D) siguiendo la Ec. 4.2 para cualquier par de valores

concentración – tiempo contemplados en el índice en el que el comportamiento tóxico de la sustancia considerada sea dependiente del tiempo. Esto permite determinar el valor del exponente  $n$ . Con dichos datos se calcula la nueva concentración  $C_{m\acute{a}x}$  a partir de:

$$C_{m\acute{a}x} = \left( \frac{D}{t_{exp}} \right)^{1/n} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Los índices están calculados para tiempos de exposición que pueden ir desde los 10 min hasta las 8 horas, pero en ocasiones puede interesar conocer qué pasa fuera de ese rango. Para ello pueden efectuarse extrapolaciones:

- Para tiempos de paso de nubes inferiores al menor periodo de referencia disponible, la concentración máxima correspondería al AEGL definido para el menor periodo de referencia, es decir, el valor techo de concentración.
- Para tiempos superiores al mayor tiempo de referencia disponible (8 horas para los AEGL) se aplica la ley de Haber:

$$C_{m\acute{a}x,x} = AEGL - X_{8h} \cdot \frac{8}{t_{exp}} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde  $t_{exp}$  se expresa en horas y X es el nivel de daño considerado (1, 2 ó 3)

- Cuando se utilizan los índices ERPG y TEEL no es posible la interpolación porque las relaciones concentración – tiempo están limitadas a un único punto (sólo disponen de un tiempo de referencia por nivel de daño). En este caso las reglas de extrapolación se realizan de la siguiente manera:
  - Si el tiempo de paso es inferior a 60 min (para los ERPGs) o 15 minutos (para los TEELs) se cogen los valores ERPG o TEEL correspondientes al valor techo.
  - Para tiempos de paso superiores a 60 min (para los ERPGs, Ec. 4.4) o 15 min (para los TEELs, Ec. 4.5) se extrapolan los índices según la ley de Haber:

$$C_{m\acute{a}x,x} = ERPG - X \cdot \frac{60}{t_{exp}} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$C_{m\acute{a}x,x} = TEEL - X \cdot \frac{15}{t_{exp}} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

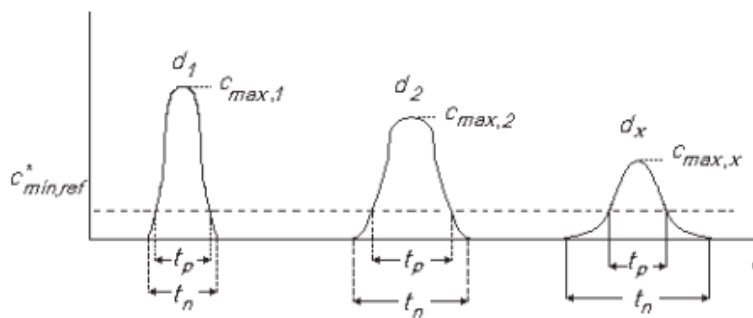
Donde  $t_{exp}$  se expresa en min y X es el nivel de daño considerado (1, 2 ó 3)

Los criterios seguidos por esta Directriz establecen una metodología que permite determinar las concentraciones o dosis que caracterizan las zonas de planificación, lo que sirve para delimitar el alcance de las zonas de planificación en nubes tóxicas.

#### 4.2.1. Determinación del alcance de la zona de intervención y zona de alerta

Una vez se han determinado las concentraciones que caracterizan las zonas de planificación, es necesario establecer el alcance de dichas zonas. La metodología seguida en este proyecto es la que se detalla en la guía relativa a dispersiones tóxicas, resumida como sigue:

1. Obtención de los perfiles concentración – tiempo de las nubes a diferentes distancias del origen del accidente dado un término fuente, Figura 15. Los perfiles presentan un modelo Gaussiano, donde a medida que el penacho se encuentra más lejos del origen ( $d_2 > d_1$ ), la curva se va achatando a causa de una mayor dispersión y, como resultado, la  $C_{máx}$ , representada como el pico de la curva, baja. Para la obtención espacial y temporal de estas representaciones se ha empleado el software ALOHA, convenientemente explicado en el apartado 4.2.2 y Anexo A1, por tratarse del programa de cálculo recomendado por la Directriz Básica. Se trata de uno de los programas más ampliamente aceptados en la simulación de dispersiones de gases peligrosos, de hecho, diversos estudios lo han utilizado en el modelado de este tipo de escenarios, demostrando que es una herramienta poderosa para este propósito (Renjith y Madhu 2010) (Chakrabarti y Parikh 2011). De esta forma queda justificada la exigencia de la Directriz de utilizar un modelo de cálculo de probada eficacia científica y reconocido a nivel internacional.



**Figura 15.** Perfiles concentración – tiempo a diferentes distancias del origen («Guía técnica de Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II])»)

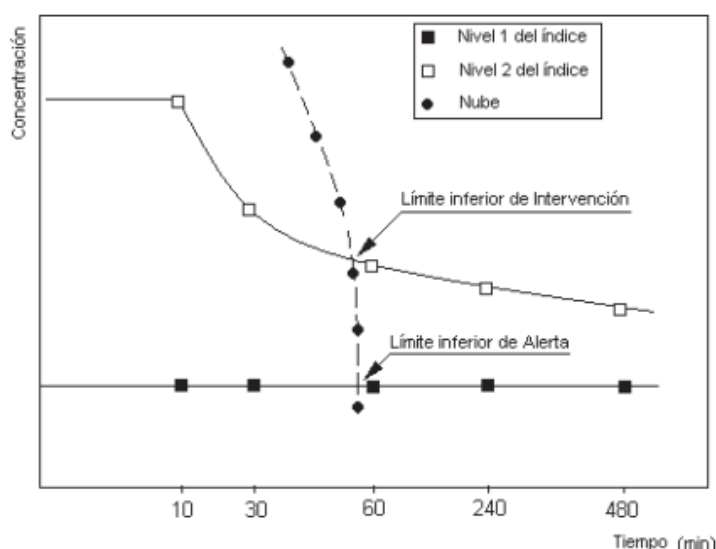
2. Determinación de los tiempos de paso de nubes ( $t_p$ ) a partir de una concentración mínima umbral. No se escogen directamente los tiempos de paso totales ( $t_n$ ) porque éstos consideran

la curva en su conjunto (teniendo en cuenta también las colas que se extienden asintóticamente a valores de concentración nula), representando tiempos de paso excesivamente elevados que se alejan de una estimación realista del suceso. La  $C_{\min}$  de referencia dependerá del índice que se esté empleando. Si la sustancia tiene AEGL, se selecciona el AEGL-1 correspondiente a 8 horas, dado que éste corresponde a la mínima concentración. Si el índice empleado es el ERPG, en ausencia de AEGL, o TEEL, en caso de no disponer de los dos anteriores, se efectúa una pequeña corrección mediante la ley de Haber:

$$C_{\min,ref}^* = \frac{1}{8} \cdot ERPG - 1_{60 \text{ min}} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

$$C_{\min,ref}^* = \frac{1}{32} \cdot TEEL - 1_{15 \text{ min}} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

3. Representación de las  $C_{\max}$  y los tiempos de paso de nube efectivos (sin considerar las colas) obtenidos de los diferentes perfiles en un diagrama concentración – tiempo que contenga los niveles 1 y 2 del índice considerado, Figura 16. Los puntos de corte del diagrama delimitan las zonas de intervención y alerta.



**Figura 16.** Intersección de pares de puntos concentración máxima – tiempos de paso con los niveles 1 y 2 del índice escogido («Guía técnica de Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II])»)

4. Finalmente se introducen las concentraciones de cortes en el programa para determinar las distancias máximas a la que se alcanza dichas concentraciones.

#### 4.2.2. Material empleado: ALOHA

El software de cálculo elegido para evaluar el riesgo del impacto tóxico y estimar la vulnerabilidad sobre la población en función del movimiento y la dispersión de los gases es ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*). Este programa, aparte de ser uno de los más ampliamente utilizados dentro de este campo, es el que recomienda la guía técnica de la Universidad de Murcia («Guía técnica de Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II])»). En este proyecto se ha utilizado la versión 5.4.7 del programa, desarrollado por la EPA (*Environmental Protection Agency*) en colaboración con la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) («ALOHA User's Manual | NEPIS | US EPA» 2007). Para llevar a cabo las simulaciones se ha empleado un PC Intel Core i7-5500U con 4GB de memoria.

El programa ALOHA, al igual que la mayoría de programas de simulación, exige que se establezcan una serie de variables de entrada para modelizar cada caso. En esta primera etapa de modelización es necesario definir:

1. La localización geográfica del accidente, el tipo de edificio situado en las proximidades al punto de fuga y la fecha y hora en la que tiene lugar el suceso.
2. La sustancia involucrada y las condiciones meteorológicas reinantes.

Una vez se han introducido los datos generales relativos al accidente, debe seleccionarse el tipo de fuga para determinar la masa o caudal fugado y elegir el algoritmo de dispersión adecuado. El programa dispone de un visor de texto en el que consultar los datos introducidos inicialmente y los valores de emisión calculados, entre otros. Además, integra representaciones gráficas para visualizar los resultados computacionales en forma de perfiles de concentración – tiempo, distribuciones dosis – tiempos, etc., en posiciones concretas especificadas por el usuario. ALOHA también estima la extensión espacial de la fuga representando gráficamente las zonas de amenaza, específicamente en los campos de riesgo para la salud humana. En el anexo A1 se ha realizado una explicación más detallada de cada uno de los campos aquí citados y del procedimiento que se ha seguido durante las simulaciones.

## 5. Evaluación de las metodologías de zonificación

El propósito de esta sección es evaluar la idoneidad de las medidas de intervención civil aplicadas en escenarios de fugas tóxicas haciendo uso del software ALOHA. En caso de no disponer de información sobre las distancias de planificación adoptadas, se espera que el resultado de las simulaciones sirva como base para prever y establecer, de forma justificada, dichas distancias para accidentes futuros. Para ello, se ha empleado la metodología de zonificación, convenientemente explicada en el apartado 4.2, sobre tres de los doce casos recopilados en el apartado 3:

- Accidente #4: Fuga de cloro en La Barre, Louisiana (1961)
- Accidente #9: Fuga de amoníaco en McPherson, Kansas (1973)
- Accidente #10: Fuga amoníaco en Pensacola, Florida (1977)

La elección de estos tres casos, y no otros, se ha hecho en base al criterio de que en estos tres accidentes se dispone de una mayor cantidad de información recopilada, sobre todo en aspectos relativos a las distancias de planificación, de forma que es posible modelizarlos con un enfoque más realista y acorde a lo acontecido. Cabe puntualizar que, en este caso, los tres accidentes seleccionados presentan sustancias que poseen índices AEGL, por lo que no existen diferencias metodológicas en el momento de abordar cada suceso. En caso de que se hubiese realizado la evaluación de accidentes con sustancias sin AEGL, se debería haber recurrido a sus índices ERPG o, en su defecto, a los TEEL y aplicar la metodología correspondiente de acuerdo a lo explicado en el apartado 4.2.

Una vez seleccionados los accidentes de interés del análisis histórico, según los criterios anteriormente mencionados, y explicada la metodología empleada para determinar el alcance de las zonas de planificación, se procede a realizar un análisis de consecuencias de la variable representativa del fenómeno para así poder estimar la magnitud del daño y evaluar las metodologías de zonificación. Para ello, en primer lugar, se va a realizar una breve introducción sobre la sustancia que interviene en cada accidente, seguido de la simulación del caso en cuestión.

### 5.1. Aspectos relativos al cloro

Características: El cloro es un gas halógeno altamente reactivo de color amarillo-verdoso que presenta un olor acre y sofocante. En condiciones normales y estado puro es un gas tóxico más pesado que el aire, por lo que tiende a formar una nube de gas en las proximidades del derrame. En situaciones ambientales de elevada humedad produce ácidos clorhídricos e hipoclorosos. Se trata de una sustancia irritante para los ojos y las vías respiratorias y, en dosis altas, tiene efectos tóxicos directos sobre los pulmones. Alcanza los pulmones porque sólo es moderadamente soluble en agua y no se absorbe

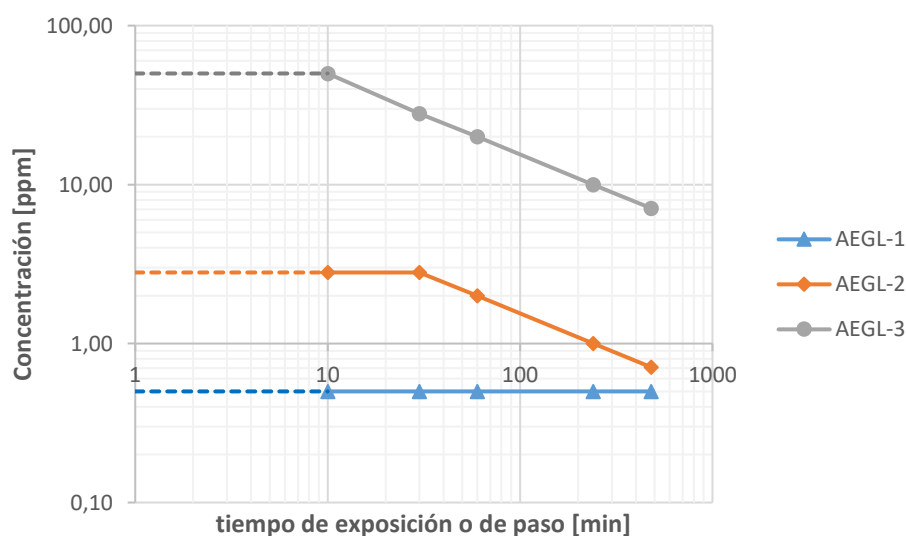
totalmente en las vías respiratorias superiores a altas concentraciones («Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals - Chlorine» 2016) («Chlorine, CAS No 7782-50-5 Chlorine»). El cloro está específicamente citado como sustancia peligrosa en la Parte 1 del Anexo del Real Decreto 1254/1999 (RD 1254 1999).

En el anexo A2 se encuentra la ficha de seguridad completa indicando el resto de particularidades y propiedades de dicha sustancia.

Valores del índice AEGL: Los valores del índice se indican en la Tabla 10 y se representan en la Figura 17 (US EPA):

**Tabla 10.** Valores del índice para el cloro expresados en ppm

AEGL	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
1	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
2	2,8	2,8	2,0	1,0	0,71
3	50	28	20	10	7,1



**Figura 17.** Representación de los valores del índice AEGL para el cloro

De acuerdo a los criterios establecidos en el apartado 4.2 se pueden comentar una serie de puntos relativos a los índices del cloro. Tal y como puede observarse en la Figura 17, para tiempos de paso inferiores al menor periodo de referencia (10 min, en este caso), los índices son extrapolados a partir de la concentración máxima que corresponde al AEGL definido para el menor periodo de referencia,



es decir, el valor techo de concentración de cada nivel de daño. Además, en relación a cada índice puede decirse que:

- El AEGL-1 define el límite inferior de la zona de alerta y es constante independientemente del tiempo de exposición.
- Por su parte, el AEGL-2 establece el límite inferior de la zona de intervención. En el intervalo comprendido entre 10 y 30 min, el comportamiento del cloro es independiente del tiempo, mientras que en el intervalo que va de 30 min a 8 h, su comportamiento tóxico sí es dependiente del tiempo y la dosis se puede calcular como sigue:

$$D = 2,8^n \cdot 30 = 2^n \cdot 60 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Esto permite estimar el parámetro  $n$  y determinar la expresión de la dosis en ese intervalo:

$$D = C_{\text{máx}}^{2,06} \cdot t_{\text{exp}} [(ppm)^{2,06} \text{ min}] \quad (\text{Ec. 5.2})$$

- El AEGL-3 sigue la ley de Haber a lo largo de todos los periodos establecidos:

$$D = 50^n \cdot 10 = 7,1^n \cdot 480 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Por lo que la dosis equivale a:

$$D = C_{\text{máx}}^{1,98} \cdot t_{\text{exp}} [(ppm)^{1,98} \text{ min}] \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Siempre que uno se desplace en ese intervalo, cualquier combinación concentración – tiempo provoca el mismo nivel de daño hasta que se alcanzan los 50 ppm. A partir de ese momento, cualquier combinación equivalente a la dosis anterior, provoca un nivel de daño superior y pueden producirse efectos amenazantes para la vida o, incluso, la muerte, de acuerdo a la tipología del nivel de daño de este índice. Por tanto 50 ppm representa un valor techo para el cloro que no debe superarse en ningún caso para tiempos de exposición inferiores a 10 min.

En relación a la simulación de los accidentes que involucran cloro, la concentración mínima de referencia que se ha considerado para no tener en cuenta las colas de las curvas en todas las representaciones concentración – tiempo es 0,5 ppm, correspondiente al AEGL-1 de 8 h. A continuación se detalla el procedimiento seguido para la determinación de las zonas de planificación del accidente #4.

### 5.1.1. Evaluación del accidente #4: Fuga de cloro causada por el descarrilamiento de un tren

#### Datos del lugar

- Localización geográfica: La Barre, Louisiana
- Fecha y hora: 31 de enero de 1961. 8:15 a.m.

En una situación típica de fuga tóxica en entorno abierto, como es el caso, no suele ser necesario definir un edificio, ya que lo que interesa es conocer cómo se propaga la emisión. Sin embargo, en este accidente el confinamiento tiene una influencia directa sobre las consecuencias. En ausencia de datos, y con el fin de evaluar la incidencia del edificio, se ha supuesto:

- Tipo de edificio: Vivienda de un solo piso unifamiliar con árboles en las inmediaciones

#### Datos químicos (disponibles en la base de datos del programa)

- Nombre de la sustancia: cloro
- Peso molecular: 70,91 g/mol
- Punto de ebullición en el ambiente: -34 °C
- Presión de vapor a temperatura ambiente: > 1 atm
- Concentración de saturación del ambiente: 1.000.000 ppm ó 100%

#### Información atmosférica

Las condiciones atmosféricas influyen de forma notable sobre la dispersión de la nube tóxica. Aspectos como la velocidad del viento y su dirección, la rugosidad del terreno, la cobertura del cielo, etc., condicionan el tipo de estabilidad y, consecuentemente, la predicción que realiza el programa sobre el tamaño de las zonas de amenaza. En caso de querer conocer con más detalle los criterios que utiliza ALOHA para fijar una estabilidad acorde al escenario, se recomienda consultar el apartado correspondiente del anexo A1. En este caso, debido a la antigüedad del accidente, no ha sido posible obtener datos atmosféricos, así que para definir la situación atmosférica se han considerado dos escenarios diferentes: escenario I (más probable) y escenario II (más desfavorable). El escenario I se ha definido a partir de un análisis histórico meteorológico de los últimos 8 años (periodo comprendido entre 2010 y 2018) atendiendo a la hora del día, época del año y situación geográfica del lugar («Port Barre, Louisiana, United States of America Historical Weather Almanac»). El escenario II se ha establecido siguiendo la situación atmosférica más desfavorable (clase de estabilidad F y velocidad media del aire de 1,5 ó 2 m/s) (Generalitat de Catalunya 2008). Los datos se muestran en la Tabla 11:

**Tabla 11.** Datos meteorológicos utilizados para la modelización

	<b>Escenario I</b>	<b>Escenario II</b>
<b>Viento [a 10 m de altura]</b>	6 mph desde SSE (sursudeste)	2 m/s desde SSE (sursudeste)
<b>Temperatura</b>	14 °C	20 °C
<b>Humedad relativa</b>	67%	50%
<b>Estabilidad</b>	C	F
<b>Rugosidad del terreno</b>	Campo abierto	Campo abierto
<b>Cobertura solar</b>	0%	0%

### **Término fuente**

En relación a los parámetros relativos al origen del escape de cloro únicamente se conoce la cantidad derramada: 30 ton, las cuales corresponden a un valor de aproximadamente 6.000 US gal (1 US gal = 3.785,4 cm<sup>3</sup>).

- Suposiciones para el estudio:

Puesto que la forma en que la sustancia se libera al medio es desconocida:

1. Se asume que el tren transporta el cloro en un depósito horizontal con una relación d/H = 2/3 y un volumen de 7.200 US gal (27,2 m<sup>3</sup>), de forma que se cumple el requisito de tener un nivel máximo de llenado inferior al 85 % de la capacidad geométrica del depósito. Dado que la fuga se produce a causa del descarrilamiento, se considera que, producto del impacto, se forma un orificio circular de 2 cm de diámetro en la parte inferior del depósito. El cloro líquido (gas licuado) contenido se encuentra a una temperatura de 12 °C.

### **Resultados de la simulación de la fuga continua del escenario I (más probable)**

Caudal máximo ponderado: 417 kg/min (recordar que ALOHA limita la duración de la fuga a una hora). En ese tiempo la cantidad total fugada es 24.102 kg de cloro.

### **Dispersión de la nube en el escenario I**

Para poder obtener perfiles completos de concentración – tiempo de la nube y observar la disminución de la concentración máxima conforme crece la distancia al origen es necesario definir un tiempo de fuga. El criterio que se ha seguido para determinar la duración de la fuga es uno ampliamente utilizado en el análisis cuantitativo de riesgo. Este criterio considera la fuga de todo el inventario durante un tiempo de 10 ó 30 min dependiendo del tipo de actuación (detección automática y actuación remota o detección automática y actuación manual) (Casal 2008) (Generalitat de Catalunya 2008). En este caso, el tiempo escogido es de 10 min para así tener perfiles de nubes de corta duración y poder

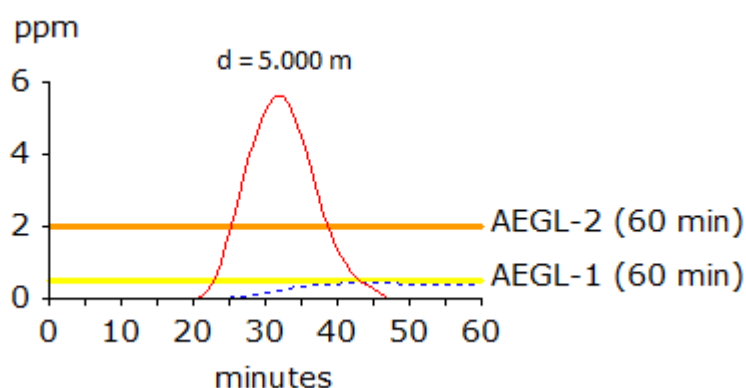
abarcar un mayor espectro de distancias. Los datos de dispersión introducidos en el programa se resumen en la Tabla 12:

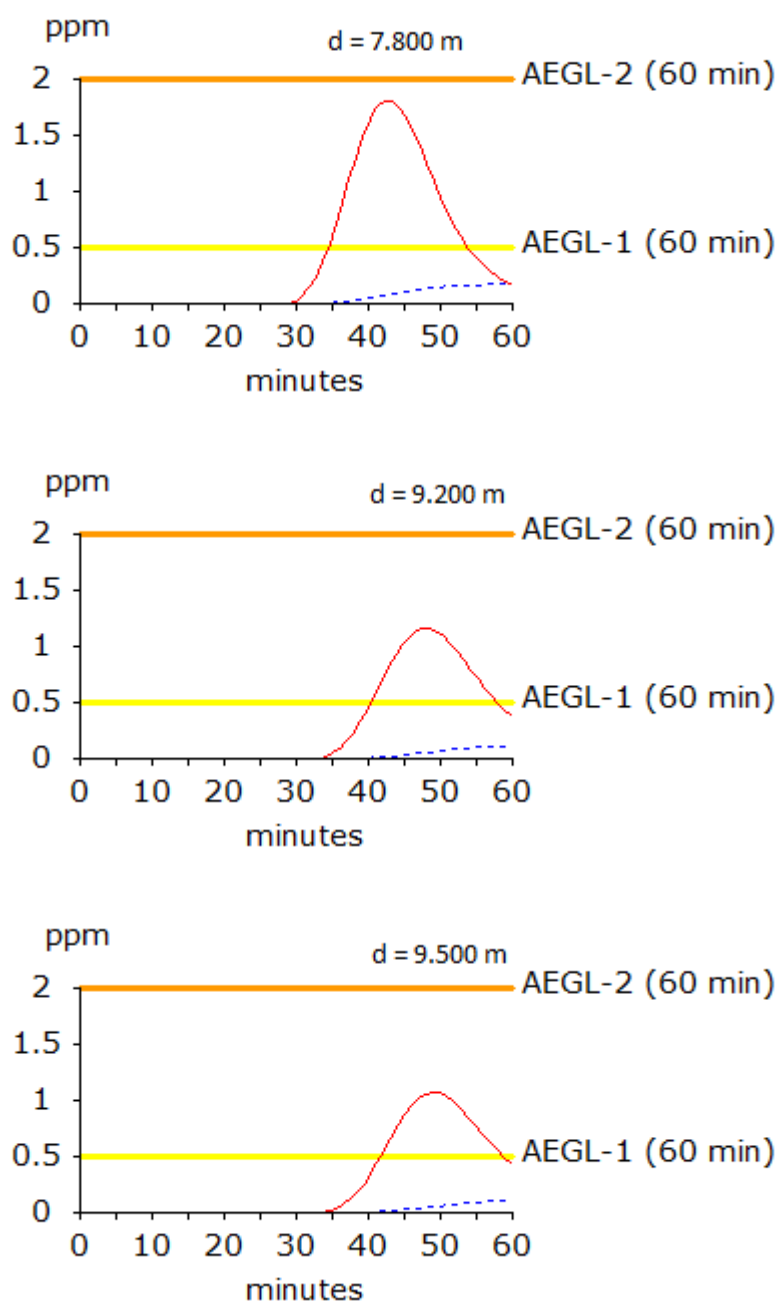
**Tabla 12.** Datos de entrada para simular la dispersión

<b>Parámetros relativos a la fuga</b>	
Caudal de fuga	417 kg/min
Duración	10 min
Cantidad total fugada	4.170 kg
Distancias consideradas	5.000, 7.000, 7.800, 8.700, 9.200, 9.500 y 10.000 m

Los enclaves resultantes para algunas de las distancias consideradas se muestran en la Figura 18. Puede observarse lo siguiente:

- La distancia considerada no puede superar en ningún momento los 10.000 m. Esto se debe a que ALOHA emplea un modelo a corto plazo limitado a un alcance de 10 km a la redonda desde donde se produce la fuga (esta observación aplica a todos los casos posteriores).
- La línea discontinua de color azul hace referencia al perfil concentración – tiempo que se tendría dentro del edificio considerado (esta observación aplica a todos los casos posteriores).
- La línea amarilla, correspondiente al AEGL-1 definido para 60 min, es la concentración mínima de referencia utilizada para determinar los tiempos de paso ( $t_p$ ) de cada curva (esta observación aplica a todos los casos posteriores).
- En todo momento, los perfiles muestran un comportamiento Gaussiano que se va achatando, progresivamente, a medida que aumenta la distancia al origen debido al fenómeno de dispersión.
- Los tiempos de paso permanecen más o menos constantes hasta distancias de 8.700 m, a partir de este momento disminuyen de forma considerable (Tabla 13).



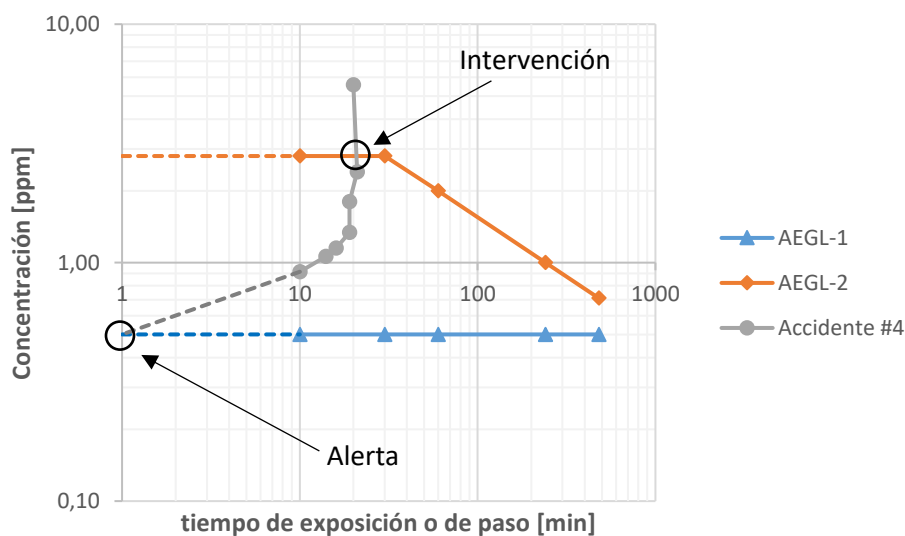


**Figura 18.** Perfiles concentración – tiempo de la nube a 5.000, 7.800, 9.200 y 9.500 m del punto de fuga para el cloro en las condiciones atmosféricas más probables (escenario I)

**Tabla 13.** Concentraciones máximas de cada curva, tanto en entorno abierto ( $C_{\text{máx out}}$ ) como en el interior de la edificación ( $C_{\text{máx in}}$ ), a las distancias consideradas (escenario I)

Distancia [m]	$C_{\text{máx out}}$ [ppm]	$C_{\text{máx in}}$ [ppm]	$t_p$ [min]
5.000	5,57	0,42	20
7.000	2,4	0,213	21
7.800	1,8	0,171	19
8.700	1,34	0,134	19
9.200	1,15	0,116	16
9.500	1,06	0,106	14
10.000	0,916	0,09	10

Ahora ya se puede proceder a determinar las zonas de intervención siguiendo el punto 3 del apartado 4.2.1. Para ello, se realiza la representación simultánea en un diagrama de las concentraciones máximas y tiempos de paso obtenidos con los valores de los índices AEGL-1 y AEGL-2, tal y como se muestra en la Figura 19:

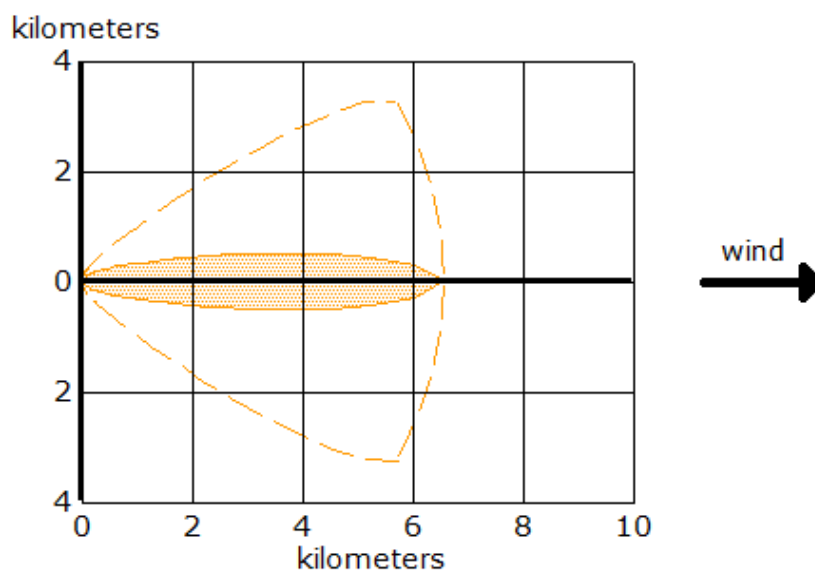



**Figura 19.** Determinación gráfica de las zonas de planificación para el accidente #4 (escenario I)

Dado que no se dispone de puntos más allá de los 10 km, ha sido necesario extender la línea concentración máxima – tiempo de paso hasta el punto  $C = 0,5$  ppm y  $t_p = 0$ . Esto puede hacerse porque dicha línea y el AEGL-1 se cortarían en  $t_p = 0$ , puesto que el índice permanece constante en todo momento (es un valor techo) y su valor, además, corresponde a la concentración mínima de referencia que se ha empleado para determinar los tiempos de paso de las nubes. Los puntos de corte resultantes definen la zona de intervención y alerta. Por último, siguiendo la secuencia detallada en el apartado 4.2.1, pueden determinarse las distancias máximas de las zonas de planificación (Figura 20 y 21) introduciendo en ALOHA las concentraciones representativas de los puntos de corte (Tabla 14).

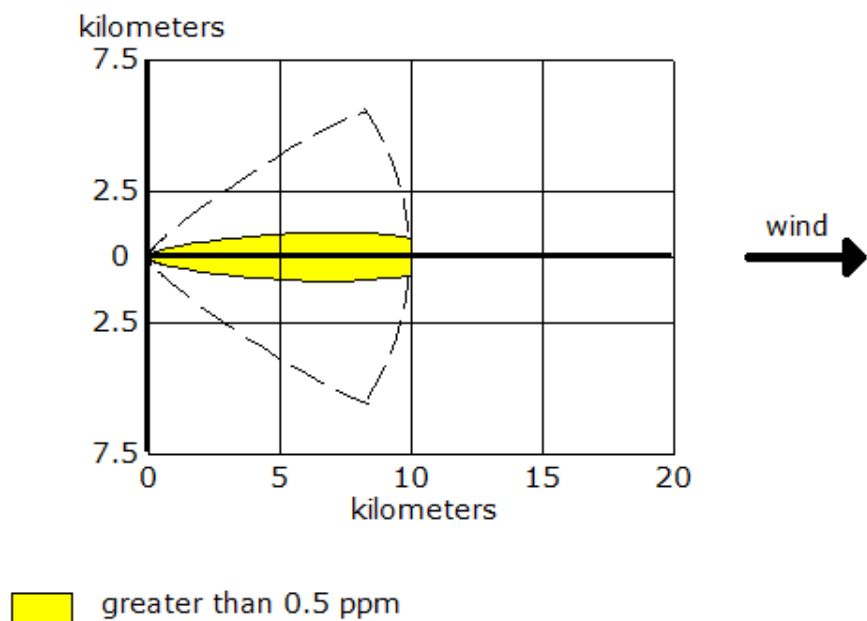
**Tabla 14.** Datos de entrada al programa del límite de alerta e intervención


	$C_{\text{máx}}$ [ppm]	$t_p$ [min]
<b>Zona de alerta</b>	0,5	0
<b>Zona de intervención</b>	2,8	20



 greater than 2.8 ppm

**Figura 20.** Representación de la zona de intervención (escenario I)



 greater than 0.5 ppm

**Figura 21.** Representación de la zona de alerta (escenario I)

En la Figura 20 y 21 se observan líneas de isoconcentración en el plano x-y a nivel de suelo orientadas según la dirección del viento. Puesto que esta dirección no deja de ser una estimación, si se quiere ser riguroso en un plan real de evacuación, las zonas de intervención y alerta deberían considerarse circulares, de forma que cualquier individuo situado dentro del radio de las mismas pueda ser tratado de acuerdo a la naturaleza de la operación requerida. Las líneas continuas delimitan las zonas de planificación y las discontinuas representan zonas de posible afectación, debido a la variabilidad en la dirección del viento. Todo esto es extensible a las representaciones obtenidas en los casos futuros, por lo que se evita realizar reiteraciones. Finalmente, puede observarse que:

- La zona de intervención alcanza una distancia máxima de 6,6 km.
- La zona de alerta se extiende a distancias más allá de los 10 km. No es posible determinar con exactitud su alcance debido a la limitación de ALOHA.

### **Resultados de la simulación de la fuga continua del escenario II (más desfavorable)**

En este punto se aborda la simulación del mismo caso, pero sometiéndolo a las condiciones atmosféricas del escenario II. Dado que muchas de las consideraciones comentadas en el escenario atmosférico anterior son extensibles a éste, se evita realizar reiteraciones. Esta vez las características de la fuga no cambian, pero sí lo hacen las distancias consideradas (ver Tabla 15):

**Tabla 15.** Datos de entrada para simular la dispersión

<b>Parámetros relativos a la fuga</b>	
Caudal de fuga	417 kg/min
Duración	10 min
Cantidad total fugada	4.170 kg
Distancias consideradas	500, 1.000, 1.800 y 5.000 m

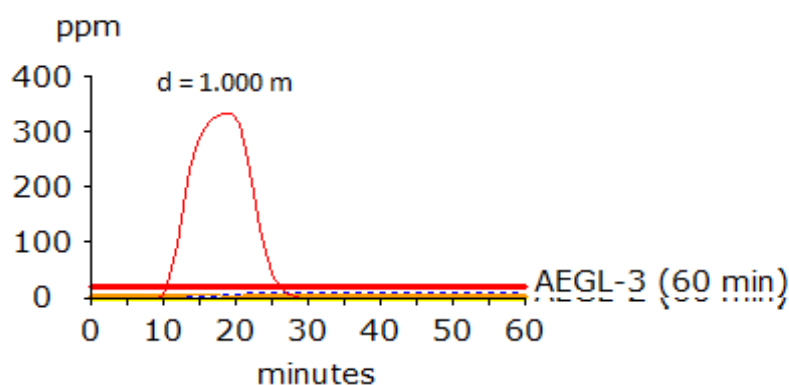
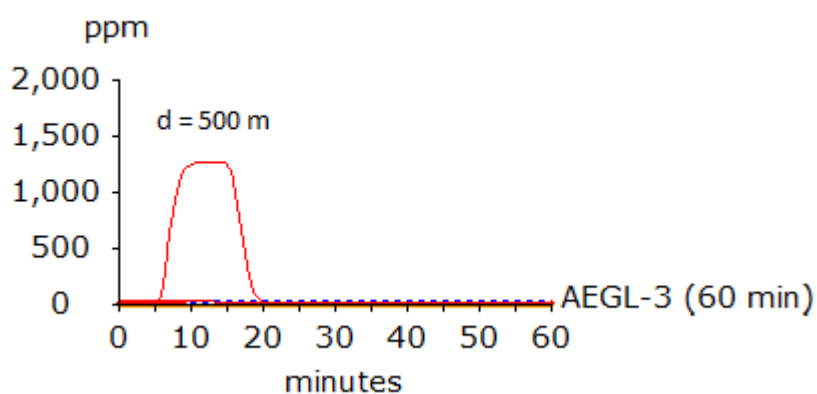
Puede observarse lo siguiente:

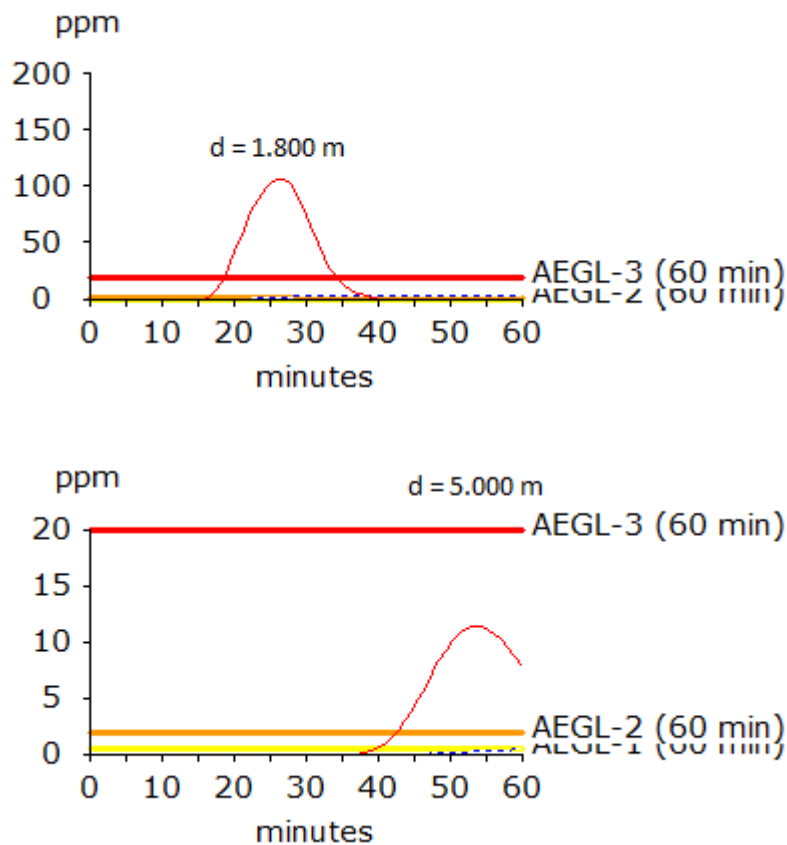
- A distancias próximas al punto de fuga (500 m), se observa una zona de concentración constante, pero a medida que aumenta la distancia el perfil recupera la morfología Gaussiana vista en el escenario anterior.
- Las curvas presentan picos de concentración mucho más elevados (Tabla 16) que los vistos en el caso previo. De hecho, a distancias de 5.000 m, se tienen concentraciones máximas de doble magnitud (11,3 ppm en vez de 5,57 ppm). En este caso las concentraciones disminuyen más lentamente a causa de las condiciones atmosféricas más desfavorables para la dispersión. Esto hace que sea imposible determinar las zonas de intervención y alerta siguiendo esta metodología, ya que las concentraciones máximas comprendidas en el rango de concentraciones entre el AEGL-2 y el AEGL-1, que son las de interés para estimar los tiempos



de paso efectivos ( $t_p$ ) y determinar los puntos de corte, se alcanzan en tiempos superiores a 1 hora, de los cuales no se tiene control por la limitación de ALOHA. Además, en la situación atmosférica considerada (estabilidad F y velocidad 2 m/s), tanto la zona de intervención como la de alerta se encuentran a distancias superiores a los 10 km. Únicamente se tiene control de la zona de amenaza correspondiente al AEGL-3 (situada a una distancia de 3,9 km del punto de fuga), la cual, por su tipología de efectos amenazantes para la vida y según los criterios fijados para el establecimiento de las zonas de planificación (Tabla 9 del apartado 4.2), no delimita ningún área.

Este escenario, no obstante, pone de manifiesto la fuerte influencia que tienen las condiciones atmosféricas sobre la dispersión de una nube de gas y, consecuentemente, sobre las consecuencias del accidente. El mismo suceso en una situación como la del escenario II provocaría unos efectos mucho más graves sobre la población.





**Figura 22.** Perfiles concentración – tiempo de la nube a 500, 1.000, 1.800 y 5.000 m del punto de fuga para el cloro en las condiciones atmosféricas más desfavorables (escenario II)

**Tabla 16.** Concentraciones máximas de cada curva a las distancias consideradas (escenario II)

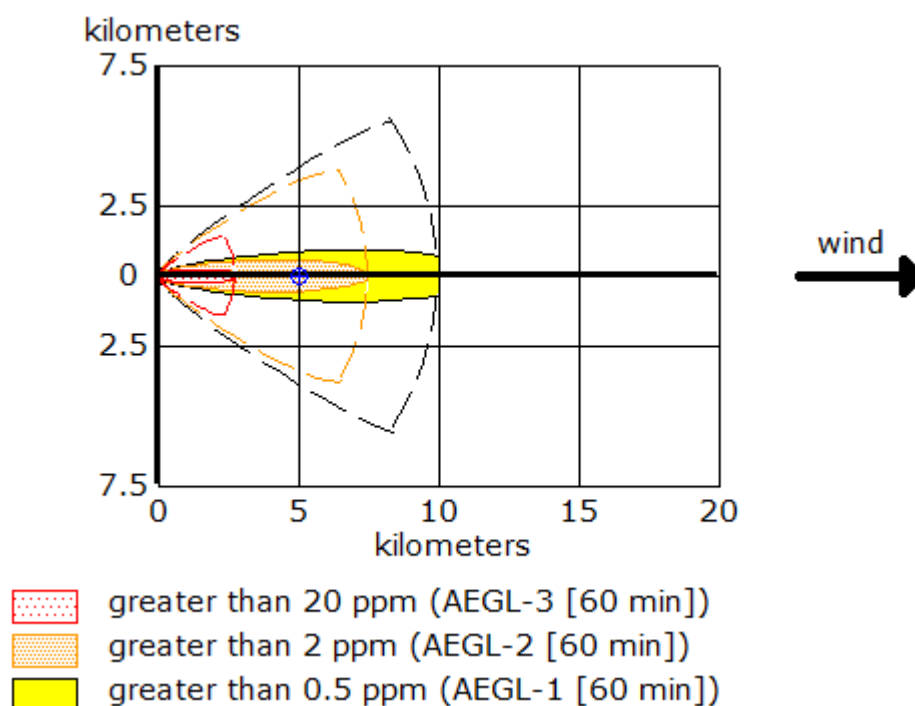
Distancia [m]	$C_{\text{máx out}}$ [ppm]
500	1.260
1.000	335
1.800	106
5.000	11,3

### Validación del modelo simulado en base al escenario real

Al inicio de esta sección se ha realizado la modelización de un caso teniendo en cuenta dos escenarios atmosféricos. Como se ha visto, las condiciones desfavorables del escenario II no permiten la aplicación de la metodología descrita en este proyecto. Sin embargo, el accidente sometido a las condiciones más probables (escenario I) que, de hecho, son las de mayor interés por adecuarse de forma más realista a la situación atmosférica real del suceso, sí ha permitido determinar las distancias de las zonas de planificación. Ahora, la pregunta que uno puede hacerse es la siguiente: ¿son estas distancias

simuladas de interés práctico para aplicarlas en situaciones de emergencia reales? Para responder a esto hay que ver si los resultados obtenidos reflejan, con cierta fidelidad, lo sucedido realmente.

En la liberación de cloro (igual que en la mayoría de sustancias tratadas en este proyecto), el peligro inmediato asociado a él es el peligro por inhalación de tóxico. Por ello, lo natural es realizar modelos de los peligros tóxicos por inhalación de esta sustancia. A continuación se muestran los resultados y las representaciones relativas al escenario I, obviando el escenario II por lo anteriormente mencionado.

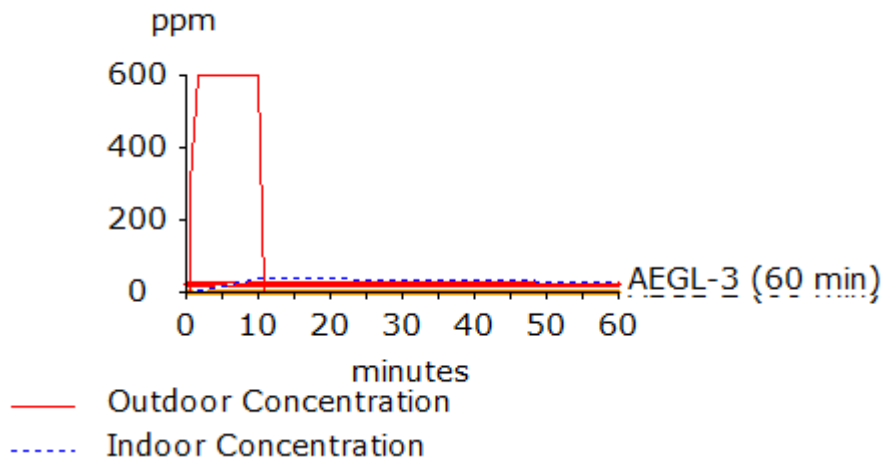


**Figura 23.** Representación de la extensión espacial de la liberación de cloro (escenario I)

Tal y como puede observarse en la Figura 23, ALOHA emplea diferentes niveles de concentración del cloro en aire asociados a los efectos adversos que esta sustancia provoca para la salud de acuerdo a los índices AEGL. En la representación se distinguen las zonas de amenaza donde existe la posibilidad de exposición a dicha sustancia. Cada zona representa el área dentro de la cual la exposición a nivel de suelo excede, en algún momento, el límite establecido por el índice. El contorno de cada zona de amenaza está definido por puntos donde la concentración máxima de cloro es igual a la de dicho índice. Las líneas discontinuas, como ya se comentó, representan zonas de posible afectación.

Según la información recopilada en el caso, 9 horas después de que se produjese el descarrilamiento del tren y, con ello, la fuga de tóxico, la concentración a 75 yardas (69 m) del punto de fuga era de 400 ppm. Este punto se ubicaría dentro de la zona de mayor riesgo (punteada de color rojo en la Figura 23)

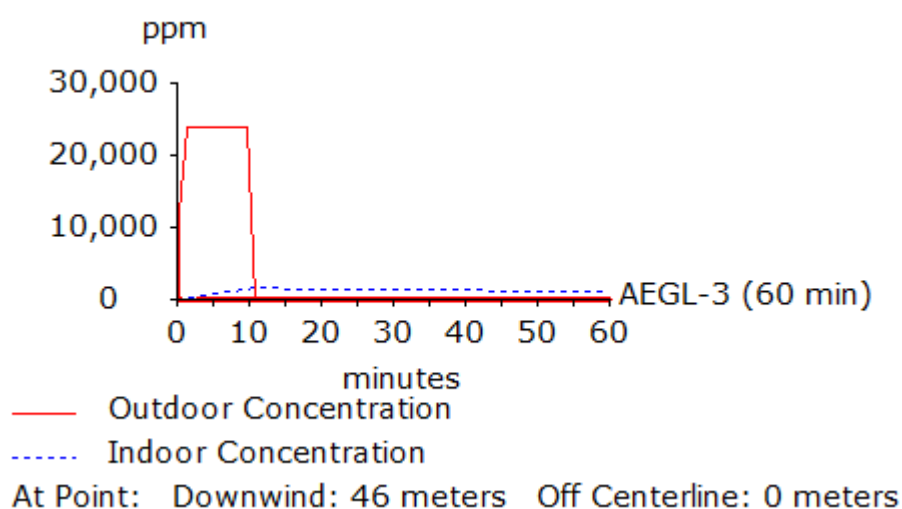
donde las concentraciones superan, en todo momento, el valor de 20 ppm. ALOHA estima que la concentración máxima de cloro en este punto sería de 597 ppm (ver Figura 24).



**Figura 24.** Representación del perfil de concentraciones a una distancia de 69 m del punto de fuga (escenario I)

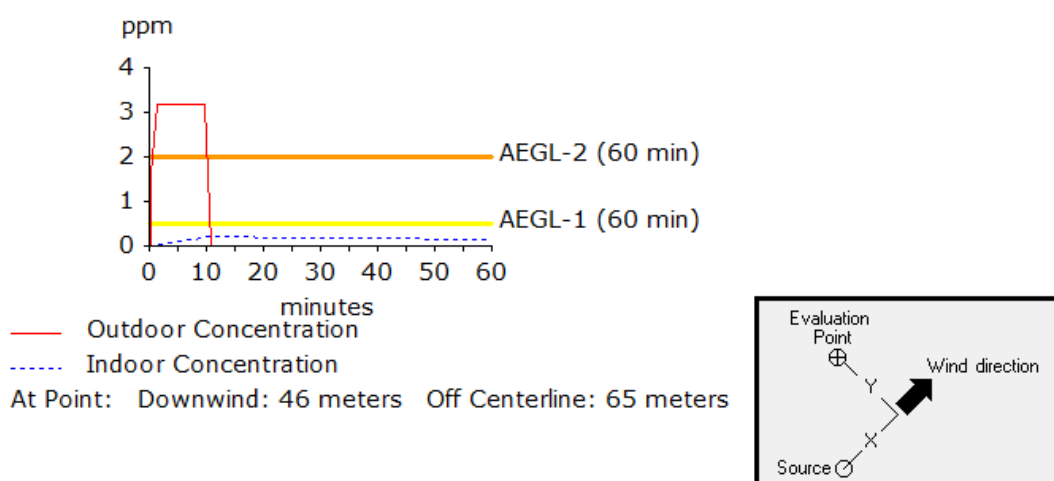
Aunque existe cierta diferencia entre el valor real medido y el simulado se puede decir que, bajo las hipótesis realizadas, ALOHA representa con bastante precisión el caso considerado. Las discrepancias se pueden atribuir a varios factores. En primer lugar, hay que tener en cuenta que la concentración de 400 ppm se mide casi 9 horas después del descarrilamiento, mientras que ALOHA da una estimación de la concentración máxima en ese punto escasos minutos después del siniestro. Como es obvio, la nube de tóxico se disipa más a medida que pasa el tiempo, y esto explica que las concentraciones vayan disminuyendo de forma paulatina. Además, la situación atmosférica, pese a ser la más probable, no es exactamente la real, y como se ha visto, las condiciones climáticas que prevalecen en el área en el momento del accidente tienen una fuerte influencia sobre la forma en que se dispersa la pluma. Por último, no se tiene información precisa del punto en el plano x-y donde se mide la concentración, únicamente se dice que está a 69 m, pero no es lo mismo estar a una distancia de 69 m en la dirección del viento, que estar a 69 m fuera de la dirección del viento.

Siguiendo con la información recopilada por diversas fuentes, un aspecto interesante de este caso es la importancia del confinamiento, ya que un bebé de 2 meses situado en una vivienda a 50 yardas (46 m) consiguió sobrevivir, mientras que un niño de 11 meses situado fuera falleció. La recreación realizada por el programa se puede observar en la Figura 25:



**Figura 25.** Representación del perfil de concentraciones a una distancia de 46 m del punto de fuga (escenario I)

La línea discontinua punteada de color azul informa sobre el perfil de concentración – tiempo dentro de la vivienda. Los picos de concentración máxima que se alcanzan en un edificio ubicado a 46 m son de 1.550 ppm (sigue siendo un valor tremendamente alto, puesto que es un punto muy próximo al punto de fuga). Este resultado no explica cómo el bebé pudo sobrevivir, pero hay que tener en cuenta un factor fundamental. La representación dada en la Figura 25 describe el suceso a 46 m siguiendo la línea de dirección del viento, por lo que ahí las concentraciones son muchísimo más altas. La misma vivienda situada dentro de un radio de 46 m, pero ubicada en una zona de posible afectación ( $y = 65$  m), y no de amenaza directa ( $y = 0$  m), padece unos efectos muy diferentes (ver Figura 26):



**Figura 26.** Representación del perfil de concentraciones a una distancia de 46 m desviado 65 m de la dirección del viento (escenario I)

Probablemente, y en un ejercicio de especulación a causa de la ausencia de información, la vivienda se encontraba desviada respecto a la dirección del viento, puesto que en esta situación cualquier individuo dentro de la casa (incluido el bebé) estaría expuesto a concentraciones de cloro que en ningún momento superarían el límite establecido por el AEGL-1, lo que explica que pudiese sobrevivir, mientras que fuera de la casa se tendrían concentraciones incluso por encima del AEGL-2. Por ello, a efectos de planificación, siempre es mejor considerar la situación más conservadora y tener en cuenta la extensión espacial de la sustancia como círculos de radio igual a la distancia de cada zona de amenaza.

No obstante, sea cual fuese la situación real, lo que evidencia este caso es que las distancias de planificación calculadas por ALOHA en el punto anterior tienen aplicabilidad en este tipo de escenarios, ya que, como se ha podido ver, los resultados reflejan con bastante credibilidad el accidente estudiado. Además, se ha comprobado la importancia del confinamiento como medida de protección pasiva en este tipo de situaciones, reduciendo la concentración respecto al exterior un factor de, aproximadamente, 16 veces.

#### **Determinación de las zonas de planificación de acuerdo a los criterios establecidos en la realización de análisis cuantitativos de riesgo**

De forma adicional, el objetivo de este apartado es determinar las zonas de planificación del caso de estudio #4 teniendo en cuenta todos los criterios complementarios establecidos en la fase de cuantificación del término fuente según la Instrucción 14/2008 SIE (Generalitat de Catalunya 2008) para el escenario I (más probable) y el escenario II (más desfavorable), dado que en realidad el término fuente era un aspecto no conocido en dicho caso. En análisis de riesgo, en situaciones de ruptura o colapso de tanques en las que el término fuente es desconocido, dentro del cálculo de consecuencias letales se recomienda considerar tres situaciones límite:

1. Fuga de todo el inventario durante un periodo de 10 min.
2. Fuga de todo el inventario.
3. Fuga del inventario a través de un orificio de 10 mm.

Así pues, se ha realizado la simulación de cada uno de los tres criterios para ambos escenarios (I y II). En la Figura 27 se puede observar la representación de las zonas de amenaza en cada situación. La Tabla 17 recopila las distancias máximas para cada caso.

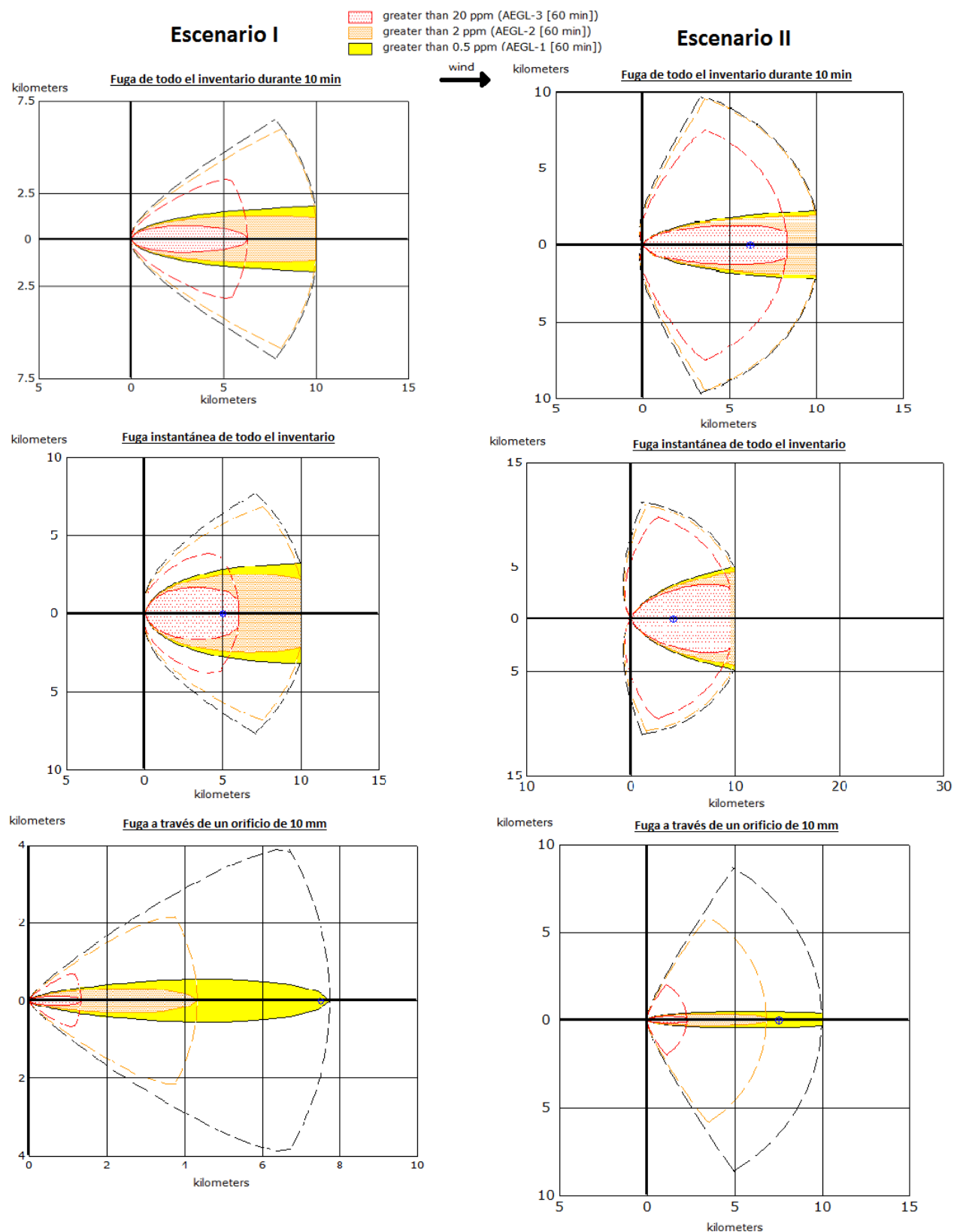


Figura 27. Representación de las zonas de amenaza para las tres situaciones diferentes de fuga

**Tabla 17.** Distancias máximas de las zonas de amenaza representadas en la Figura 27 de acuerdo a la tipología de los índices AEGL (**rojo** para concentraciones > AEGL-3, **naranja** > AEGL-2 y **amarillo** > AEGL-1)

	Escenario I	Escenario II
<b>Fuga de todo el inventario durante 10 min</b>	<b>6,3 km</b> > 10 km > 10 km	<b>8,3 km</b> > 10 km > 10 km
<b>Fuga instantánea de todo el inventario</b>	<b>6,1 km</b> > 10 km > 10 km	<b>9,6 km</b> > 10 km > 10 km
<b>Fuga a través de un orificio de 10 mm</b>	<b>1,4 km</b> <b>4,3 km</b> <b>7,7 km</b>	<b>2,3 km</b> <b>6,9 km</b> > 10 km

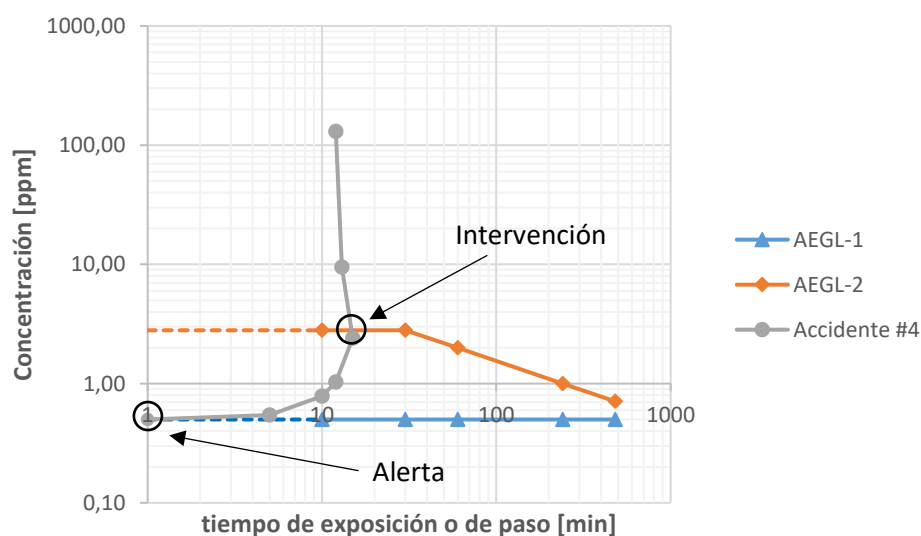
Tal y como se observa, para el escenario II siempre se incrementan las distancias de las zonas de amenaza, independientemente del criterio de fuga, ya que las condiciones climatológicas son las más desfavorables y provocan una mayor dispersión de la nube. Por su parte, la metodología de cálculo de las zonas de planificación aporta valores precisos sólo en la tercera situación límite, definida como “Fuga a través de un orificio de 10 mm”, y únicamente en el caso del escenario I (para el escenario II las concentraciones máximas inferiores al AEGL-2 se obtienen a distancias superiores a los 6,9 km, pero esas curvas corresponden a tiempos superiores a 1 hora desde el momento de la fuga y no se pueden visualizar en ALOHA). Tanto si se considera la fuga como una ruptura catastrófica (fuga instantánea) del vagón cisterna donde las 30 ton de cloro se liberan de forma directa como si se trata de una fuga de todo el inventario durante 10 min, las concentraciones resultantes de las zonas de amenaza son muy altas y dificultan la aplicación de la metodología, dado que no se dispone de información precisa para las zonas correspondientes a las concentraciones situadas entre el índice AEGL-2 y AEGL-1, puesto que ALOHA sólo proporciona valores útiles para distancias inferiores a los 10 km. En ambos casos, tanto para el escenario I como para el II, las zonas de intervención y alerta se situarían a distancias superiores a 10 km, pero no es posible precisar más.

El cálculo de las zonas de planificación para la situación “Fuga a través de un orificio de 10 mm” se realiza de forma idéntica a lo visto anteriormente. En la Tabla 18 se recopilan las concentraciones y tiempos de paso efectivos a las distancias consideradas para el escenario I. La Figura 28 muestra la representación simultánea de los puntos concentración – tiempo junto a los índices AEGL-1 y 2.



**Tabla 18.** Concentraciones máximas y tiempos de paso para “Fuga a través de un orificio de 10 mm” en las condiciones del escenario I (más probable) a las distancias consideradas

Distancia [m]	$C_{\text{máx out}}$ [ppm]	$t_p$ [min]
500	130	12
2.000	9,47	13
4.000	2,41	15
5.800	1,03	12
6.500	0,783	10
7.500	0,545	5

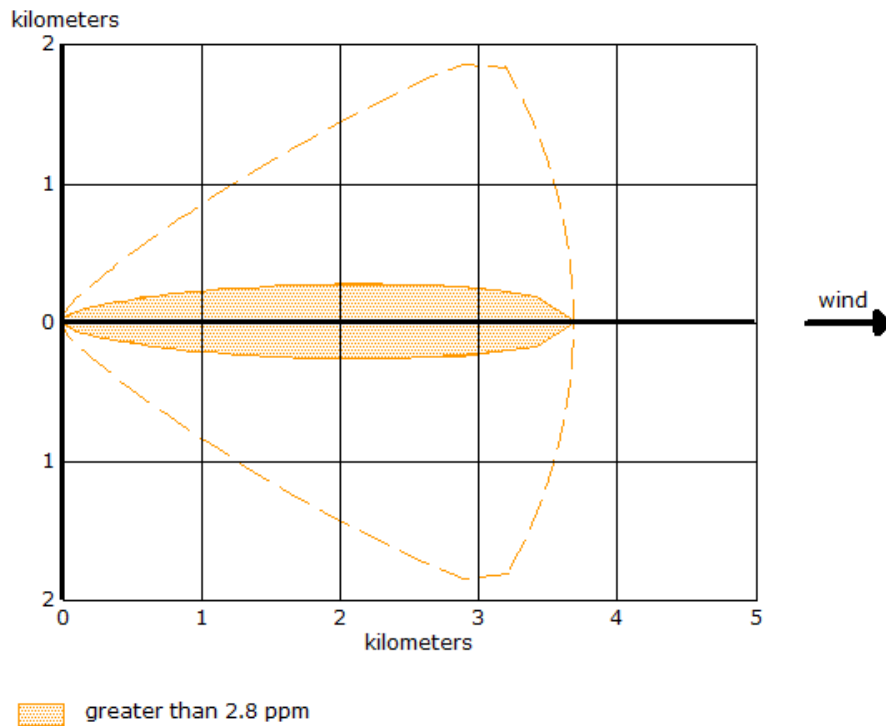


**Figura 28.** Determinación gráfica de las zonas de planificación para el accidente #4 modelizado bajo el criterio “Fuga a través de un orificio de 10 mm” (escenario I)

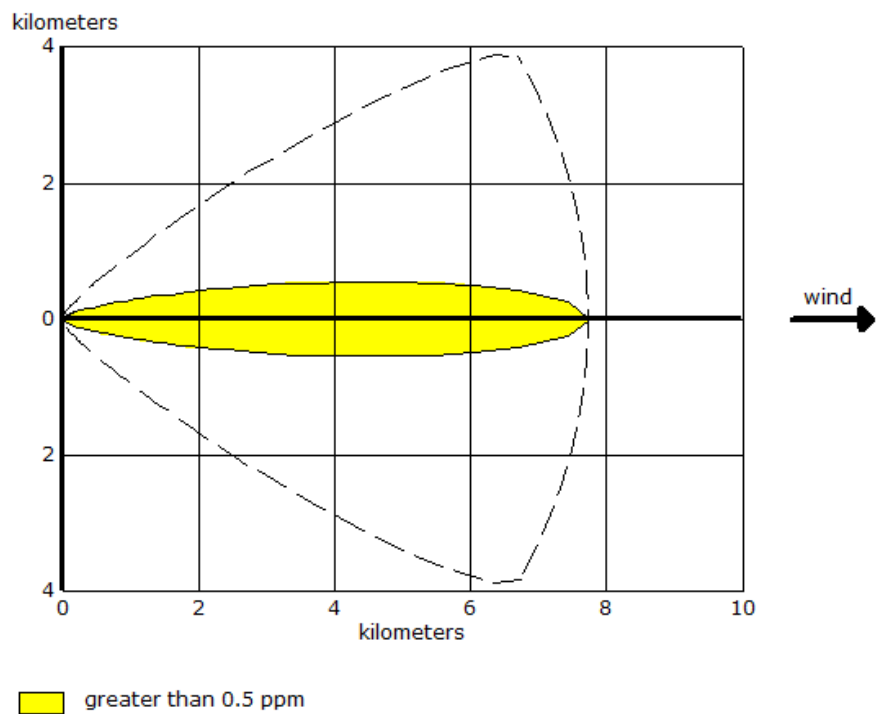
Los puntos de corte (Tabla 19) obtenidos se introducen en ALOHA y se determina la extensión de cada una de las zonas.

**Tabla 19.** Datos de entrada al programa del límite de alerta e intervención

	$C_{\text{máx}}$ [ppm]	$t_p$ [min]
Zona de alerta	0,5	0
Zona de intervención	2,8	14



**Figura 29.** Representación de la zona de intervención con criterio “Fuga a través de un orificio de 10 mm” (escenario I)



**Figura 30.** Representación de la zona de alerta con criterio “Fuga a través de un orificio de 10 mm” (escenario I)

Si el criterio es “Fuga a través de un orificio de 10 mm” puede observarse que:

- La zona de intervención alcanza una distancia de 3,7 km.
- La zona de alerta llega hasta una distancia de 7,7 km.

Sin embargo, cuando el accidente #4 se modeliza siguiendo la suposición 1) realizada en el cálculo del término fuente, las distancias de planificación son superiores (6,6 y más de 10 km para la zona de intervención y alerta, respectivamente) pese a tratarse del mismo escenario atmosférico (escenario I). Este hecho se atribuye a uno de los criterios establecidos en dicha suposición, donde se considera un agujero con el doble de diámetro (2 cm en vez de 10 mm). Como resultado, el caudal fugado es mayor y, por ende, la cantidad de materia y concentración de la nube de gas aumenta, incrementando sus dimensiones y extendiéndose hasta mayores distancias. Por tanto, la consideración de un orificio de 10 mm repercute en una disminución de las distancias de planificación.

La forma en que se ha abordado este último punto es extensible a los accidentes posteriores, por lo que se considera correctamente ejemplificado el método y se desestima realizar reiteraciones.

## 5.2. Aspectos relativos al amoniaco

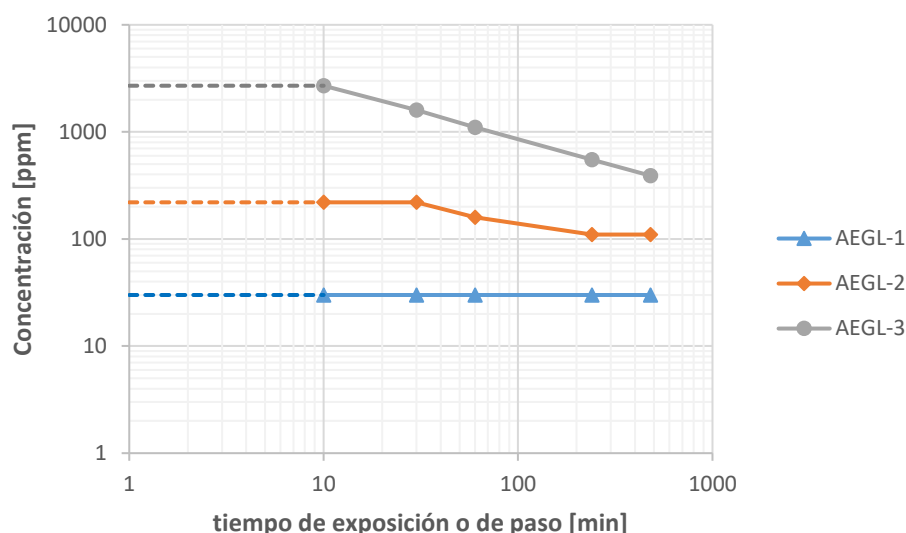
Características: El amoniaco es un gas incoloro, corrosivo y alcalino con olor acre y sofocante. El rango de detección de olor se sitúa entre 5 y 53 ppm. Se trata de una sustancia muy soluble en agua. Debido a sus propiedades exotérmicas, el amoniaco forma hidróxido de amonio y produce calor cuando entra en contacto con superficies húmedas, como pueden ser las membranas mucosas. Las propiedades corrosivas y exotérmicas del amoniaco pueden provocar daños inmediatos (irritación y quemaduras severas) en los ojos, la piel y las membranas mucosas de la cavidad oral. A altas concentraciones causa daños severos en el tracto respiratorio e irritación de los tejidos que puede dar origen a edema pulmonar y neumonía («Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals - Ammonia» 2007).

En el anexo A3 se encuentra la ficha de seguridad completa indicando el resto de particularidades y propiedades de dicha sustancia.

Valores del índice AEGL: Los valores del índice se muestran en la Tabla 20 y están representados en la Figura 31 (US EPA) («AMMONIA, ANHYDROUS | CAMEO Chemicals | NOAA»):

**Tabla 20.** Valores del índice para el amoníaco expresados en ppm

AEGL	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
1	30	30	30	30	30
2	220	220	160	110	110
3	2700	1600	1100	550	390

**Figura 31.** Representación de los valores del índice AEGL para el amoníaco

De forma análoga al cloro, los criterios seguidos para cada nivel de daño son extensibles al amoníaco:

- Para el AEGL-1 se tiene, en todo el intervalo considerado, un valor techo de 30 ppm. Este índice define el límite inferior de la zona de alerta.
- El AEGL-2, que define el límite inferior de la zona de intervención, presenta dos intervalos donde la concentración de tóxico es independiente del tiempo (de 10 a 30 min y de 4 a 8 h). Lo demás sigue prácticamente la ley de Haber, expresándose la dosis como:

$$D = C_{m\acute{a}x}^{2,18} \cdot t_{exp} [(ppm)^{2,18} min] \quad (Ec. 5.5)$$

- Finalmente, el AEGL-3 se puede expresar siguiendo la ley de Haber, donde la dosis es:

$$D = C_{m\acute{a}x}^{2,00} \cdot t_{exp} [(ppm)^{2,00} min] \quad (Ec. 5.6)$$

Relativo a las simulaciones de los accidentes que involucran amoníaco, la concentración mínima de referencia que se ha considerado para descartar las colas de las curvas en todas las representaciones

concentración – tiempo es 30 ppm, correspondiente al AEGL-1 de 8 h (extrapolable también al resto de periodos del AEGL-1, al tratarse de un valor techo constante). A continuación se muestra el procedimiento seguido en la determinación de las zonas de planificación de los accidentes #9 y #10.

### **5.2.1. Evaluación del accidente #9: Fuga de amoníaco debido a fallo en una tubería**

#### **Datos del lugar**

- Localización geográfica: Conway, Kansas
- Fecha y hora: 6 de diciembre de 1973. 4:30 a.m.

Aunque el incidente no causó consecuencias graves sobre personas, hubo una serie de individuos ubicados en determinadas viviendas al sur de la fuga que fueron evacuados por precaución. Para evaluar la necesidad o no de las medidas de evacuación de dicha zona se ha considerado lo siguiente:

- Tipo de edificio: Vivienda de dos pisos con árboles en las inmediaciones

#### **Datos químicos (disponibles en la base de datos del programa)**

- Nombre de la sustancia: amoníaco
- Peso molecular: 17,03 g/mol
- Punto de ebullición en el ambiente: -34,5 °C
- Presión de vapor a temperatura ambiente: > 1 atm
- Concentración de saturación del ambiente: 1.000.000 ppm ó 100%

#### **Información atmosférica**

De igual forma al caso de estudio anterior, se consideran dos situaciones atmosféricas. La situación más probable (escenario I) se define por un viento de 7,5 millas/h (valor medio considerando los dos extremos registrados en el caso) dirección sur. Teniendo en cuenta que horas antes había habido una fuerte tormenta, se esperan temperaturas bajas y una humedad en el ambiente relativamente elevada a causa de la precipitación, acompañado de un cielo parcialmente cubierto. No obstante, para fijar las condiciones finales de este escenario, además de considerar estos criterios, se ha realizado un análisis histórico de las condiciones meteorológicas de los últimos 8 años centrado en el temporal típico de Conway esa estación del año y en situaciones atmosféricas similares («Conway, Kansas, United States of America Historical Weather Almanac»). Análogamente al accidente de cloro anterior, también se fija una situación atmosférica más desfavorable (escenario II). Los datos de entrada finales se pueden observar en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Datos meteorológicos utilizados para la modelización

	Escenario I	Escenario II
Viento [a 10 m de altura]	7,5 mph desde N	2 m/s desde N
Temperatura	10 °C	20 °C
Humedad relativa	80%	50%
Estabilidad	D	F
Rugosidad del terreno	Campo abierto	Campo abierto
Cobertura solar	60%	0%

**Término fuente**

La tubería transporta 2.500 ton/d. La fuga provoca el escape de 230 ton de amoníaco durante un periodo de 30 min.

**Resultados de la simulación de la fuga continua del escenario I (más probable)**

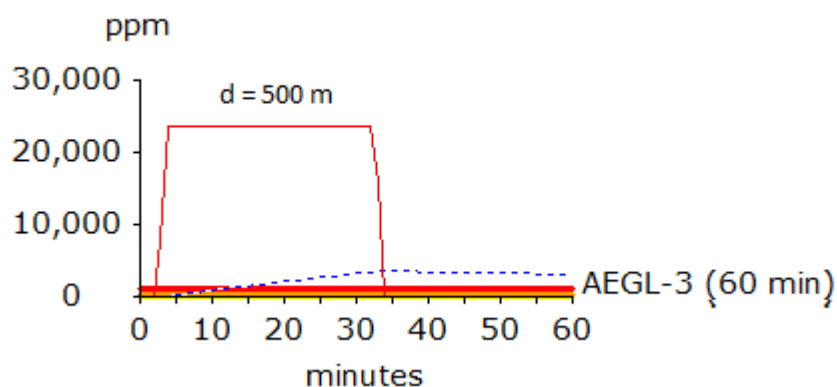
Conocido el tiempo que dura la fuga, se considera que ésta es continua con un caudal medio de 7.667 kg/min.

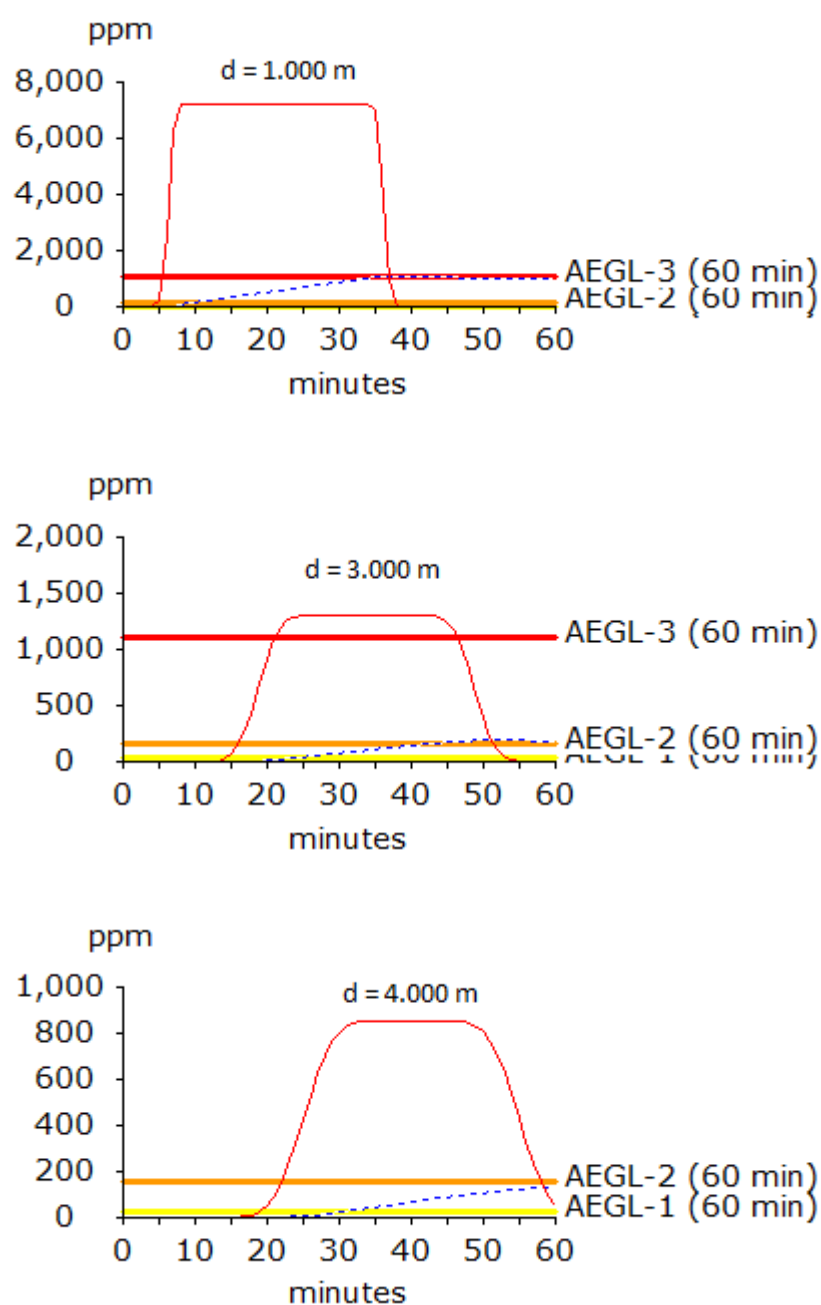
**Dispersión de la nube en el escenario I**

En la Tabla 22 se pueden ver los datos finales de entrada introducidos en el módulo de dispersión de ALOHA:

**Tabla 22.** Datos de entrada para simular la dispersión

<b>Parámetros relativos a la fuga</b>	
Caudal de fuga	7.667 kg/min
Duración	30 min
Cantidad total fugada	230.010 kg
Distancias consideradas	500, 1.000, 3.000 y 4.000 m





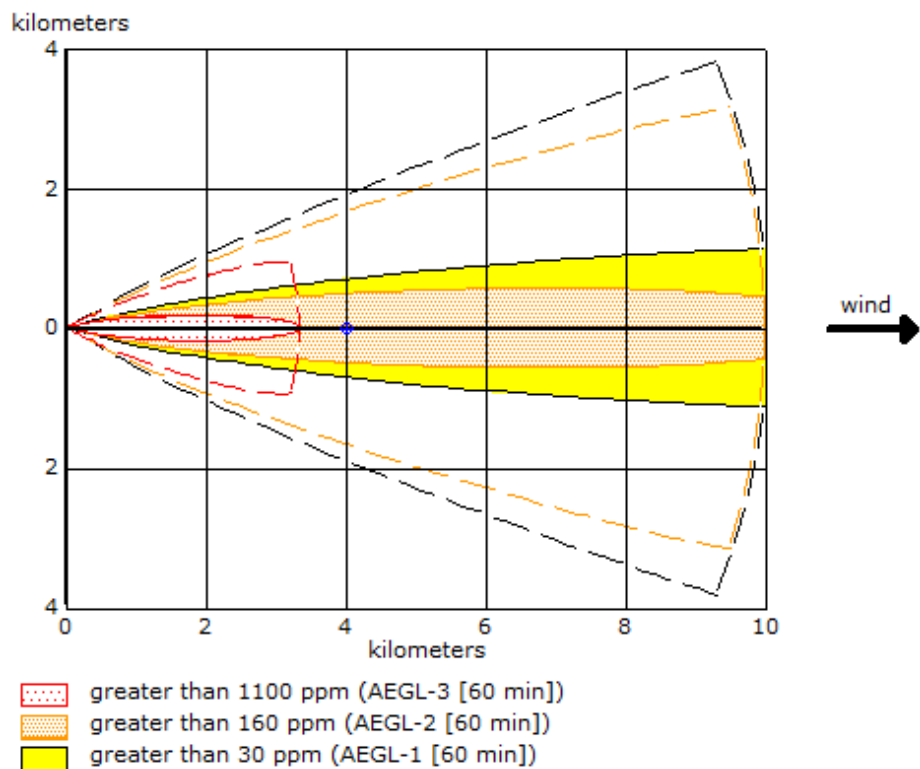
**Figura 32.** Perfiles concentración – tiempo de la nube a 500, 1.000, 3.000 y 4.000 m del punto de fuga para el amoníaco en las condiciones atmosféricas más probables (escenario I)

Puede observarse:

- Los perfiles concentración – tiempo de la nube son singulares. La región de concentración constante no acaba de desaparecer nunca en las distancias consideradas, a diferencia del resto

de situaciones. Esto se debe a que la cantidad de amoniaco que se libera es enorme (230 ton) y el tiempo que dura la fuga también es más elevado que en el resto de casos.

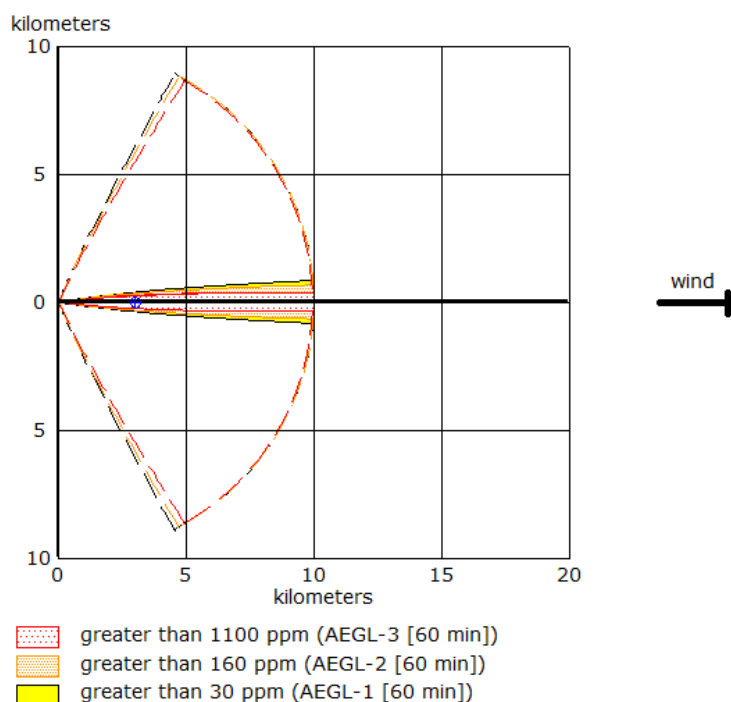
- Las concentraciones máximas altas y la forma tan lenta en que disminuyen las curvas imposibilita la aplicación de la metodología. El motivo es el mismo que el argumentado en el accidente #4 en sus condiciones más desfavorable, con la diferencia de que ahora es el escenario más probable el que presenta los puntos de corte de interés, situados entre el AEGL-2 y AEGL-1, a distancias más allá de los 10 km y tiempos superiores a 1 hora. De hecho, como puede verse en la Figura 33, ésta queda truncada a dicha distancia, región a partir de la cual ALOHA no proporciona resultados fiables, y únicamente se dispone de información relacionado con la zona correspondiente al AEGL-1, situada a 3,3 km.



**Figura 33.** Representación de las zonas de amenaza (escenario I)

Como es lógico, se desestima realizar las simulaciones en la situación más desfavorable. Si no es posible aplicar la metodología en las condiciones del escenario I, difícilmente podrá realizarse la extrapolación al escenario II, donde ni siquiera se dispone de información útil relacionada con la distancia de cualquiera de los límites (ver Figura 34).





**Figura 34.** Representación de las zonas de amenaza (escenario II)

#### Validación del modelo simulado en base al escenario real

Esta sección, para el caso estudiado, no puede evaluarse en profundidad debido a la ausencia de resultados concluyentes en ambos escenarios, sin embargo, se aprovecha para realizar una puntualización de la información disponible del accidente basándose en las escasas representaciones obtenidas.

Sorprendentemente, a pesar de producirse una enorme liberación de tóxico y ver como las zonas de amenaza simuladas se extienden a distancias por encima de los 10 km, no se da ninguna consecuencia fatal sobre personas, únicamente se registran 2 heridos. El motivo al que se atribuye este hecho es, según las fuentes del registro del caso, que muchos habitantes se habían desplazado a ciudades cercanas a causa de los prolongados fallos eléctricos provocados por las tormentas. Adicionalmente se especifica que a 8 millas (13 km, aproximadamente) del origen del accidente, se detectaron síntomas de irritación y olor. Este último dato está en consonancia con lo visto en la Figura 33. Aunque ésta está limitada a 10.000 m, si se sigue la tendencia marcada, a 13 km se preveen tener concentraciones entre el índice AEGL-2 y AEGL-1, rango en el que es frecuente experimentar olores y ligeras irritaciones (Tabla 9 del apartado 4.2).

### 5.2.2. Evaluación del accidente #10: Fuga de amoníaco causado por el descarrilamiento de un tren

#### Datos del lugar

- Localización geográfica: Pensacola, Florida
- Fecha y hora: 9 de noviembre de 1977. 6:06 p.m.

No se tiene constancia de ningún tipo de efecto característico relacionado con los edificios que haga plantearse su modelización, por lo que el tipo de vivienda es irrelevante y se considera sin ningún tipo de influencia sobre el estudio de este caso.

#### Datos químicos (disponibles en la base de datos del programa)

- Nombre de la sustancia: amoníaco
- Peso molecular: 17,03 g/mol
- Punto de ebullición en el ambiente: -33,5 °C
- Presión de vapor a temperatura ambiente: > 1 atm
- Concentración de saturación del ambiente: 1.000.000 ppm ó 100%

#### Información atmosférica

Los datos meteorológicos que se tienen del caso hacen posible elaborar un escenario I (más probable) que representa con bastante fidelidad la situación atmosférica del momento sin necesidad de realizar un análisis histórico exhaustivo de la meteorología del lugar («Pensacola, Florida, United States of America Historical Weather Almanac»). En relación al escenario I, dado que la velocidad del viento durante las seis primeras horas tras el accidente cambia drásticamente, se ha fijado un valor medio entre los dos estados extremos. Nuevamente se define un escenario alternativo que representa las condiciones más desfavorables (escenario II). En la Tabla 23 pueden observarse los números definitivos que cuantifican la información meteorológica disponible.

**Tabla 23.** Datos meteorológicos utilizados para la modelización

	Escenario I	Escenario II
<b>Viento [a 10 m de altura]</b>	8 mph desde SO	2 m/s desde N
<b>Temperatura</b>	20 °C	20 °C
<b>Humedad relativa</b>	82%	50%
<b>Estabilidad</b>	D	F
<b>Rugosidad del terreno</b>	Campo abierto	Campo abierto
<b>Cobertura solar</b>	87%	0%



### **Término fuente**

Los registros del accidente hacen referencia a un vertido a la atmósfera provocado por la “perforación de unos tanques que transportaban amoníaco” justo después del descarrilamiento. La consecuencia directa fue el derrame de 40 ton de dicha sustancia.

- Suposiciones para el estudio:

Dado que se proporciona información acerca de la formación de un derrame de 40 ton, el cual se vaporiza rápidamente, parece razonable tratar el caso como un charco donde la evaporación del amoníaco derramado depende de las condiciones atmosféricas que gobiernan. Se supone:

1. Un charco de 40.000 kg no confinado de extensión 1.000 m<sup>2</sup>. El criterio se adopta escogiendo un área que sea algo inferior a la situación límite para derrames en superficie terrestre de extensión desconocida y sin ningún tipo de confinamiento (Casal 2008) (Generalitat de Catalunya 2008). No se escoge la situación más conservadora (1.500 m<sup>2</sup>) porque el caudal de evaporación resultante es más elevado y las concentraciones máximas alcanzadas son demasiado altas como para aplicar la metodología.
2. En relación al suelo, se utiliza el terreno por defecto que emplea ALOHA para situaciones en las que se desconoce si la superficie es de cemento, arenosa, etc. Se asume que la temperatura del suelo es igual a la atmosférica reinante.
3. En ausencia de información, se considera que la temperatura inicial del charco es la de evaporación del amoníaco en las condiciones ambientales: -33,5 °C.

Estas suposiciones aplican a las simulaciones del caudal de evaporación de los dos escenarios.

### **Resultados de la simulación del caudal de evaporación del escenario I (más probable)**

El caudal máximo ponderado de evaporación es 1.540 kg/min.

- Suposiciones para el estudio:

1. En el registro se hace referencia a que un controlador aéreo de un aeropuerto cercano, 4 minutos después de que se produzca la fuga, observa la nube. En estas condiciones es previsible que el operario informe rápidamente a las brigadas pertinentes, de forma que se supone que el amoníaco únicamente está vaporizando durante un periodo de 10 min (Generalitat de Catalunya 2008), que es el tiempo promedio que se estipula que tardan los bomberos hasta que empiezan a cubrir el charco con espuma para evitar que siga vaporizando más amoníaco. Por tanto, la cantidad total transferida a la atmósfera es de 15.400 kg, es decir, vaporiza casi el 40% en masa del vertido.

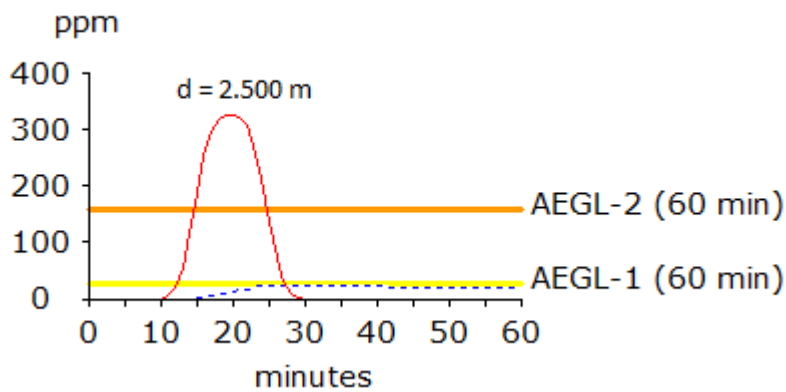
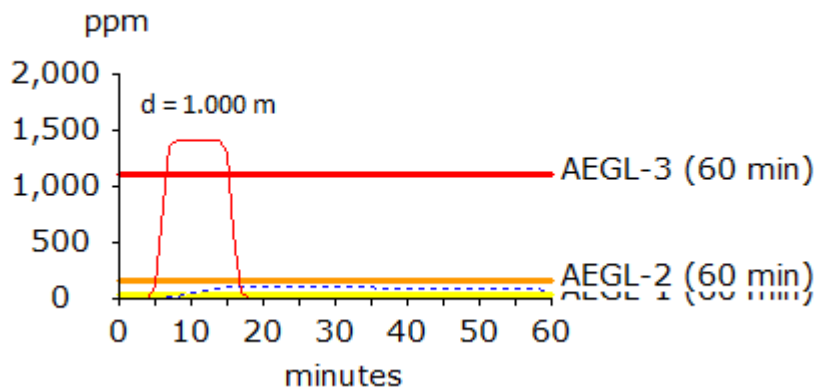
### Dispersión de la nube en el escenario I

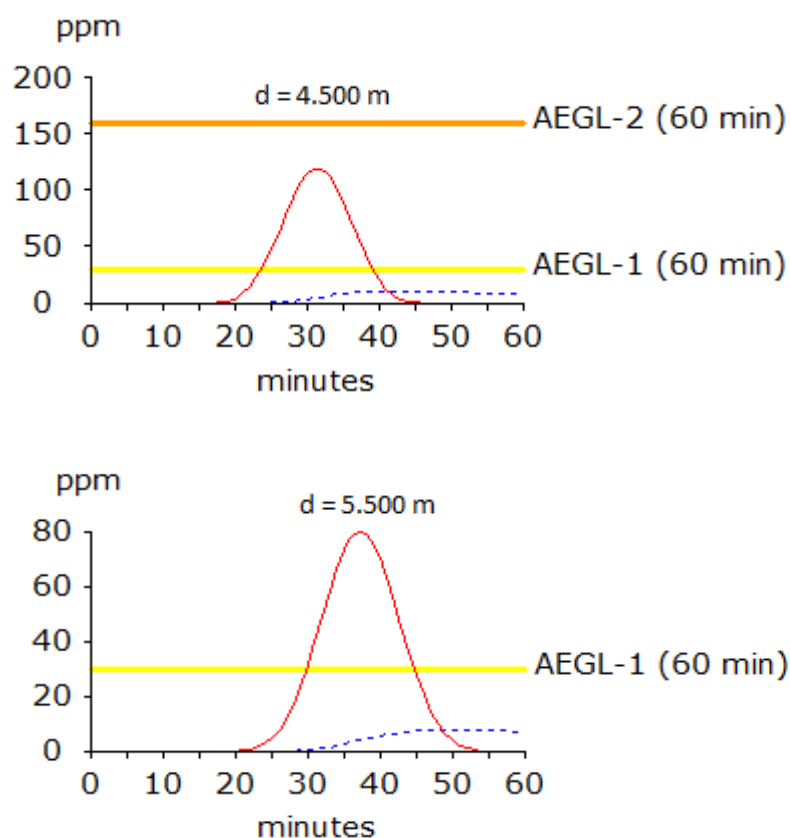
En la Tabla 24 se pueden ver los datos finales de entrada introducidos en el módulo de dispersión de ALOHA para obtener las representaciones concentración – tiempo a diferentes distancias respecto al origen.

**Tabla 24.** Datos de entrada para simular la dispersión

#### Parámetros relativos a la fuga

Caudal de fuga	1.540 kg/min
Duración	10 min
Cantidad total fugada	15.400 kg
Distancias consideradas	500, 1.000, 2.500, 4.500, 5.500, 7.000 y 8.500 m





**Figura 35.** Perfiles concentración – tiempo de la nube a 1.000, 2.500, 4.500 y 5.500 m del punto de fuga para el amoníaco en las condiciones atmosféricas más probables (escenario I)

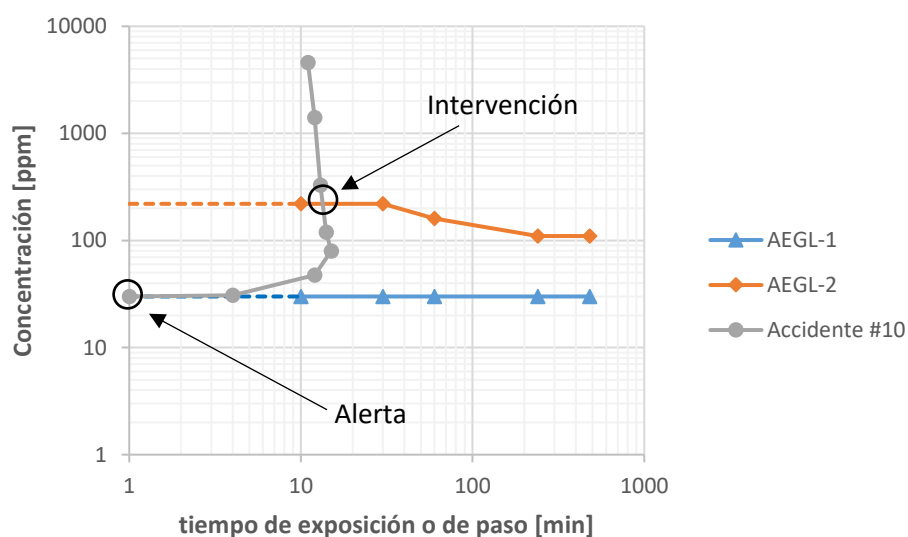
En la Figura 35 puede observarse que:

- Al ser una fuga de duración relativamente baja, nuevamente los perfiles comienzan teniendo forma de “meseta” para acabar formando curvas Gaussianas, cuyas alturas disminuyen y sus bases se ensanchan a medida que se alejan del origen del accidente.
- Los tiempos de paso (ver Tabla 25) aumentan de forma paulatina hasta distancias de, aproximadamente, 5.500 m, para luego disminuir de forma drástica debido al fenómeno de dispersión.

**Tabla 25.** Concentraciones máximas y tiempos de paso de cada curva a las distancias consideradas (escenario I)

Distancia [m]	$C_{\text{máx out}}$ [ppm]	$t_p$ [min]
500	4.590	11
1.000	1.400	12
2.500	328	13
4.500	119	14
5.500	79,8	15
7.000	47,5	12
8.500	30,7	4

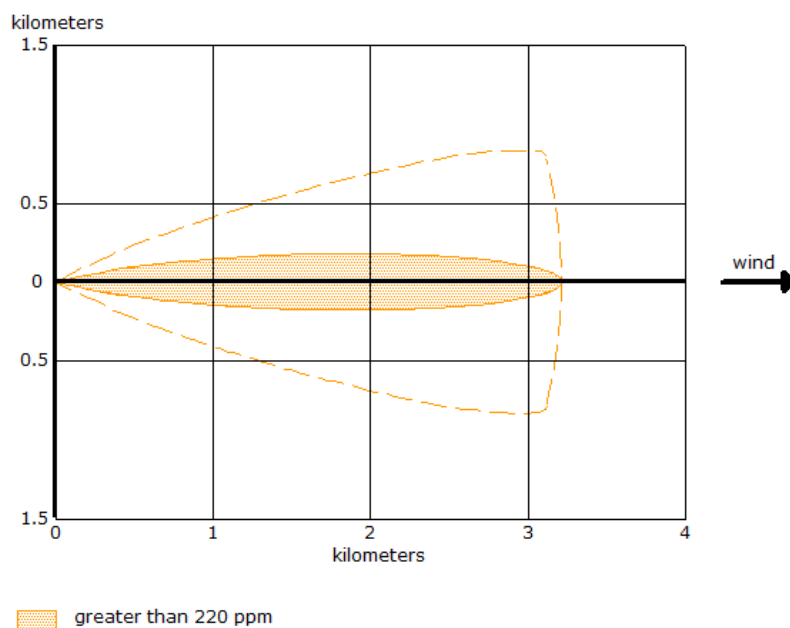
La representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la Tabla 25, junto con los valores de los índices AEGL-1 y AEGL-2 del amoniaco, permite establecer los puntos de corte que delimitan las zonas de intervención (AEGL-2) y alerta (AEGL-1) (ver Figura 36).

**Figura 36.** Determinación gráfica de las zonas de planificación para el accidente #10 (escenario I)

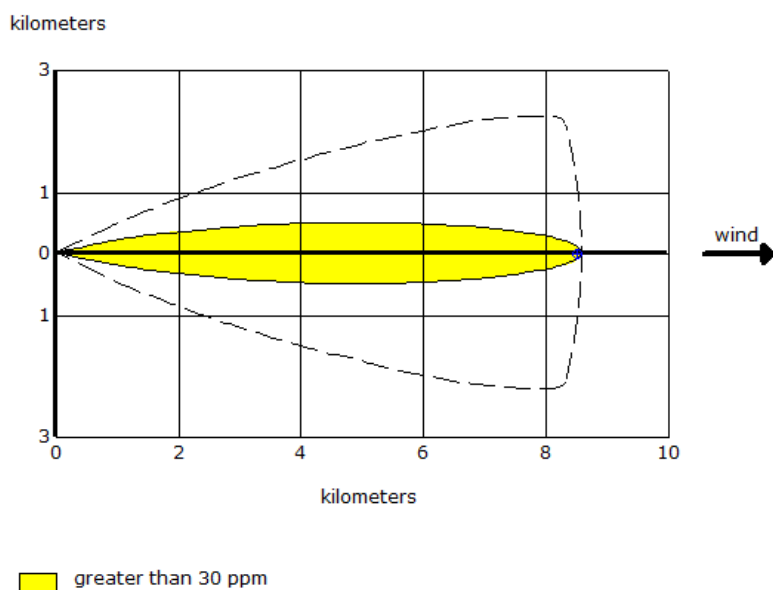
Las concentraciones máximas de los puntos de corte (Tabla 26) se introducen en el programa para determinar las extensiones superficiales de la nube a ras de suelo y establecer las distancias de planificación (Figura 37 y 38).

**Tabla 26.** Datos de entrada al programa del límite de alerta e intervención

	$C_{\text{máx}}$ [ppm]	$t_p$ [min]
Zona de alerta	30	0
Zona de intervención	220	13



**Figura 37.** Representación de la zona de intervención (escenario I)



**Figura 38.** Representación de la zona de alerta (escenario I)

Los resultados muestran lo siguiente:

- La zona de intervención alcanza una distancia máxima de 3,2 km.
- La zona de alerta se encuentra a una distancia de 8,6 km.

### **Resultados de la simulación del caudal de evaporación del escenario II (más desfavorable)**

El caudal máximo ponderado de evaporación es 1.310 kg/min. No es el mismo caudal del escenario anterior porque su valor depende de las condiciones atmosféricas.

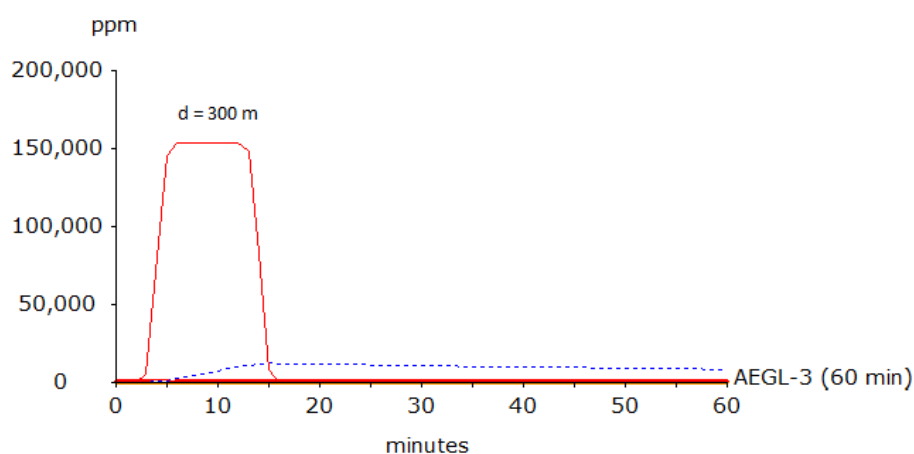
### **Dispersión de la nube en el escenario II**

Manteniendo la duración de la fuga en 10 min, de acuerdo al criterio establecido en el escenario previo, se obtienen los perfiles de la nube a diferentes distancias. Los valores de entrada introducidos se recogen en la Tabla 27.

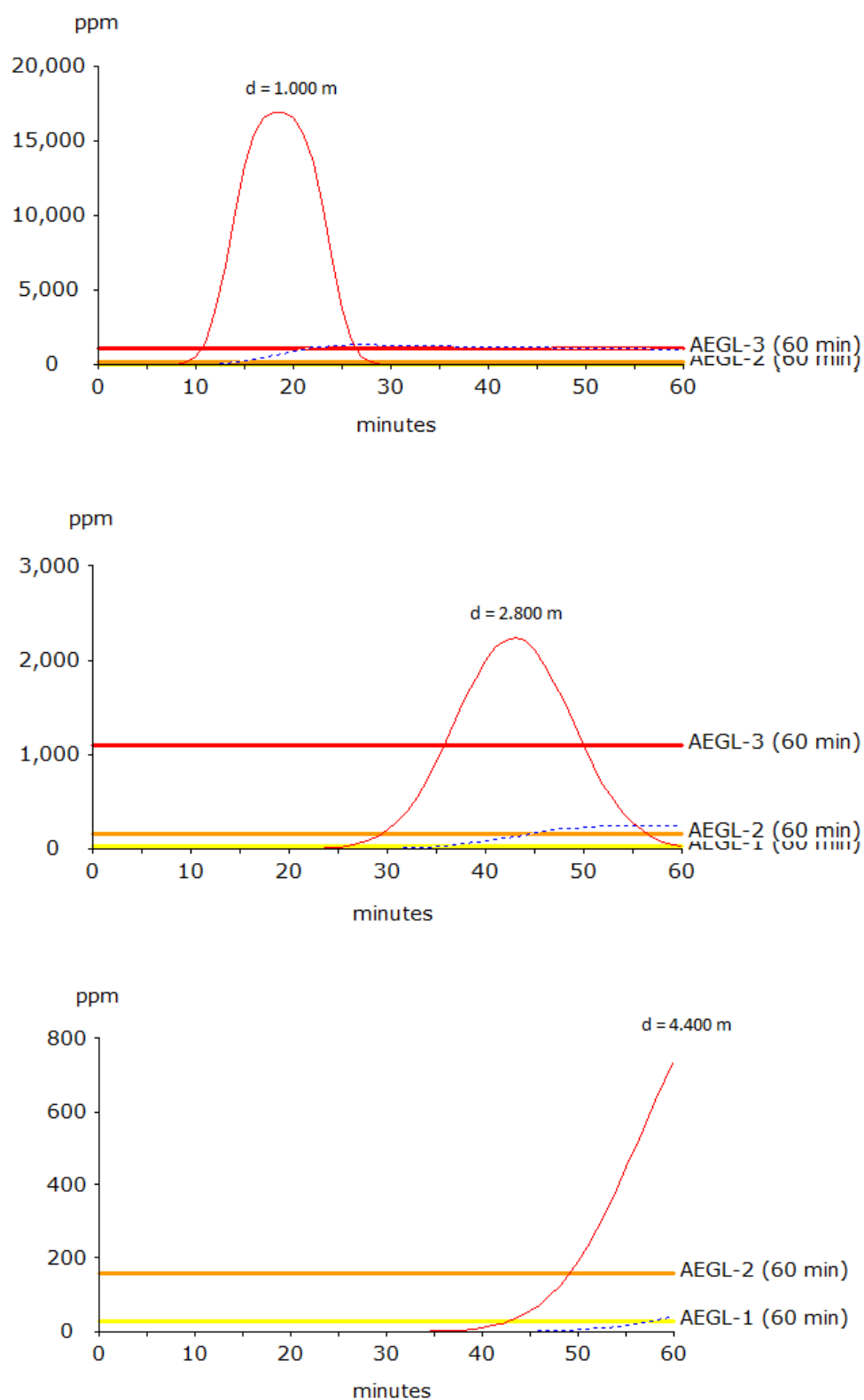
**Tabla 27.** Datos de entrada para simular la dispersión

#### **Parámetros relativos a la fuga**

Caudal de fuga	1.310 kg/min
Duración	10 min
Cantidad total fugada	13.100 kg
Distancias consideradas	300, 1.000, 2.800 y 4.400 m







**Figura 39.** Perfiles concentración – tiempo de la nube a 300, 1.000, 2.800 y 4.400 m del punto de fuga para el amoníaco en las condiciones atmosféricas más desfavorables (escenario II)

De forma similar a lo que pasa en los accidentes anteriores cuando se introducen las condiciones más desfavorables, se observa:

- Una región de concentración constante en regiones muy próximas al punto de fuga (300 m) y una progresiva adaptación de la curva a un perfil Gaussiano a medida que las distancias se incrementan.
- Las concentraciones máximas alcanzadas en este escenario II son mucho más altas si se comparan con las del escenario I para las mismas distancias. Por ejemplo, a 1.000 m del punto de fuga, se tienen concentraciones de prácticamente 17.000 ppm (Tabla 28), mientras que en la anterior situación las máximas son de 1.400 ppm (Tabla 25).
- Resulta imposible determinar los tiempos de paso para distancias superiores a los 2.800 m (parte del perfil de la nube desaparece a partir de ese momento). De hecho, para puntos más allá de los 4.500 m, ALOHA no realiza predicciones. El motivo es que dichos puntos corresponden a regiones que se alcanzan en tiempos de más de 1 hora a sotavento de la fuente desde que comienza la liberación de tóxico, y para esas situaciones (igual que ocurría con la limitación de 10 km vista anteriormente) el programa no es capaz de saber cuál es la velocidad y dirección del viento, puesto que éste cambia con frecuencia.

Aunque las condiciones ambientales impuestas por el escenario II hacen imposible la aplicación de la metodología, se verifica, una vez más, la fuerte influencia que tienen las condiciones atmosféricas sobre la evolución de la dispersión. Esto pone de manifiesto la enorme dificultad que existe en la modelización de este tipo de accidentes, ya que hay una gran variedad de parámetros y variables, sobre todo relativos a las condiciones atmosféricas reinantes, que dificultan las predicciones y afectan a los resultados finales al añadir más incertidumbre.

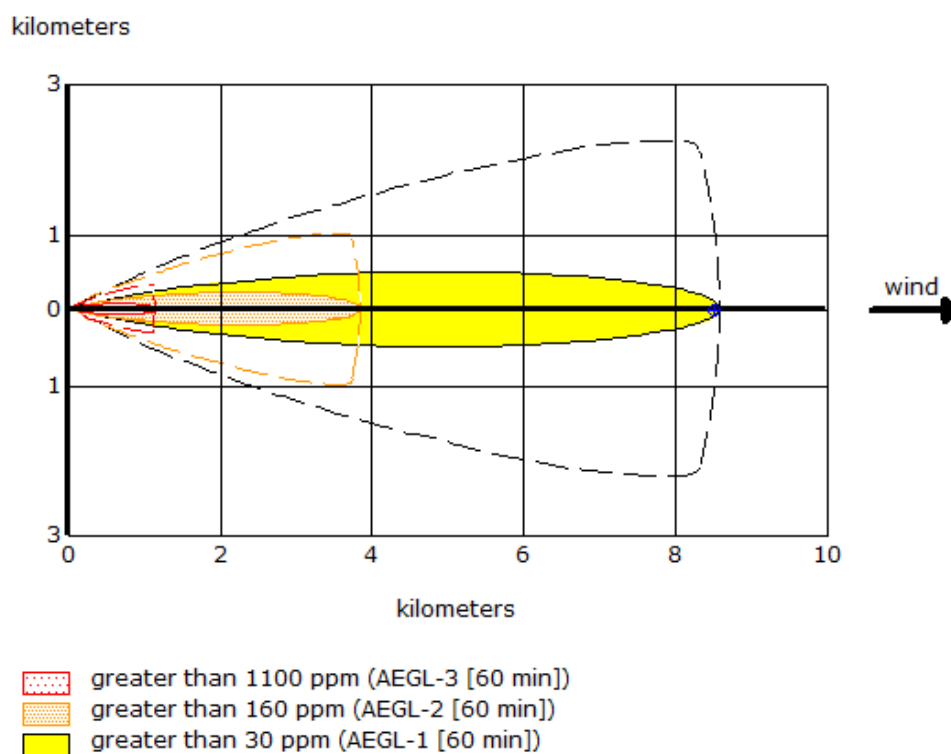
**Tabla 28.** Concentraciones máximas de cada curva a las distancias consideradas (escenario II)

Distancia [m]	C <sub>máx out</sub> [ppm]
300	153.000
1.000	16.800
2.800	2.230
4.400	735

### **Validación del modelo simulado en base al escenario real**

De forma análoga a lo visto en los dos casos anteriores, en esta sección se realiza la validación del modelo del accidente #10 comparando los resultados obtenidos de la simulación con la información registrada para determinar, hasta qué punto, las distancias de planificación tienen aplicabilidad sobre el caso. Las simulaciones que se consideran son las del escenario I, que a su vez son las de mayor interés por reproducir de forma más fidedigna el accidente al estar basadas en las condiciones reales.

La Figura 40 representa las distintas zonas de amenaza en función de los diferentes niveles de concentración del amoniaco, de acuerdo a los índices AEGL, una vez ha sido modelizado el escenario.

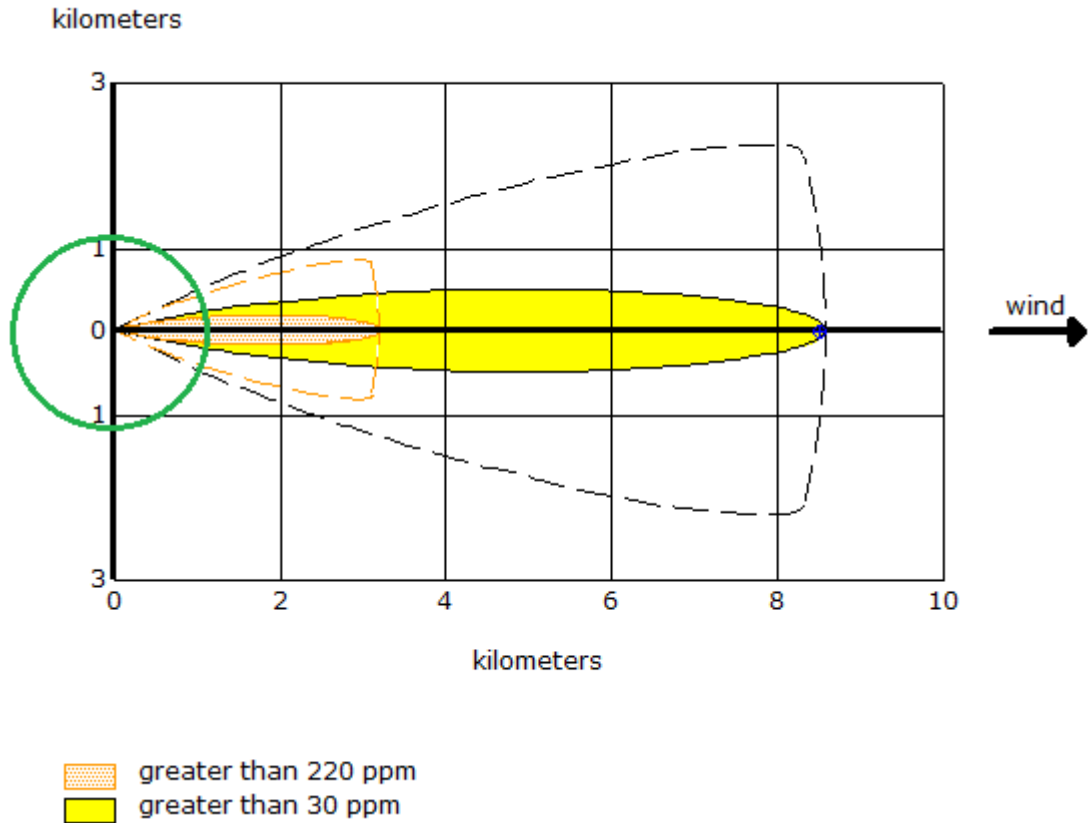


**Figura 40.** Representación de la extensión espacial de la liberación de amoniaco (escenario I)

Si se escogen como referencia las líneas continuas que delimitan la región amarilla, y considerando éstas como la extensión física en la que se concentra la mayor parte de la nube, se puede observar que se extiende, perpendicularmente a la dirección del viento, una distancia de 1,2 km en su zona más ancha (algo más de medio kilómetro a cada lado, aproximadamente). En el registro se especificaba que la nube resultante presentaba 1 milla de diámetro (1,6 km). Aunque la apreciación visual es un factor importante, las dimensiones simuladas están en relativa sintonía con lo observado en el momento del suceso.

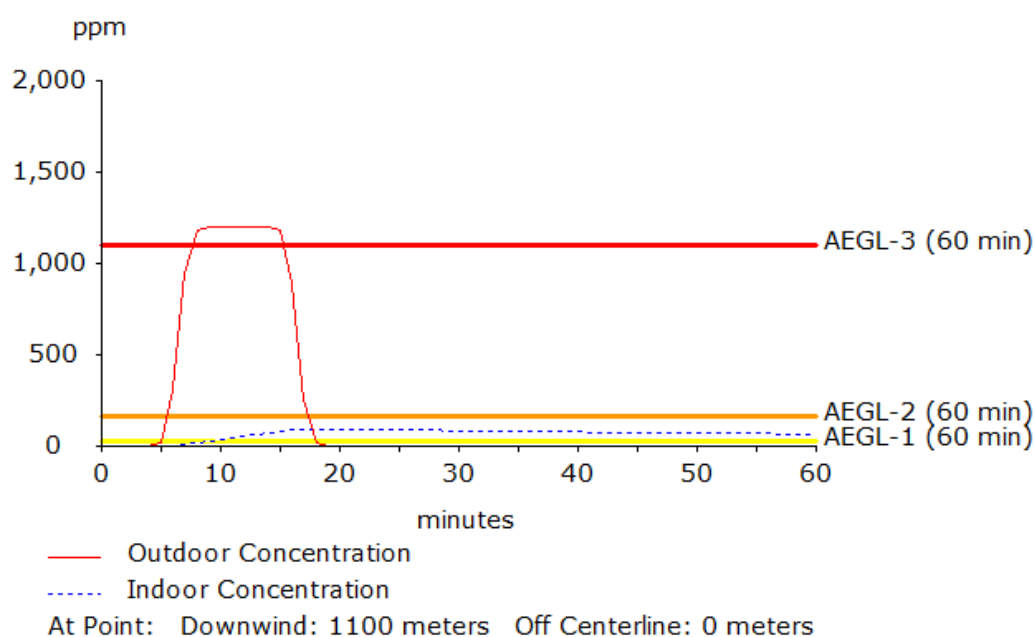
En el accidente se efectuó la evacuación de 1.000 personas, 500 de las cuales se encontraban dentro de un radio de 3.500 ft (1,1 km) al punto de fuga. De acuerdo a las distancias de planificación previamente calculadas, los 500 individuos se encontrarían dentro de la región representada con un círculo verde (Figura 41). Esto indica que estarían situados dentro de la zona de intervención, caracterizada por concentraciones superiores a los 220 ppm, superando el valor techo del AEGL-2. Es más, por la proximidad al punto de fuga, parte de estos individuos se ubicarían en la región coloreada

en rojo, extensible hasta una distancia de 1,2 km (Figura 40), donde se tienen concentraciones por encima de los 1.100 ppm.

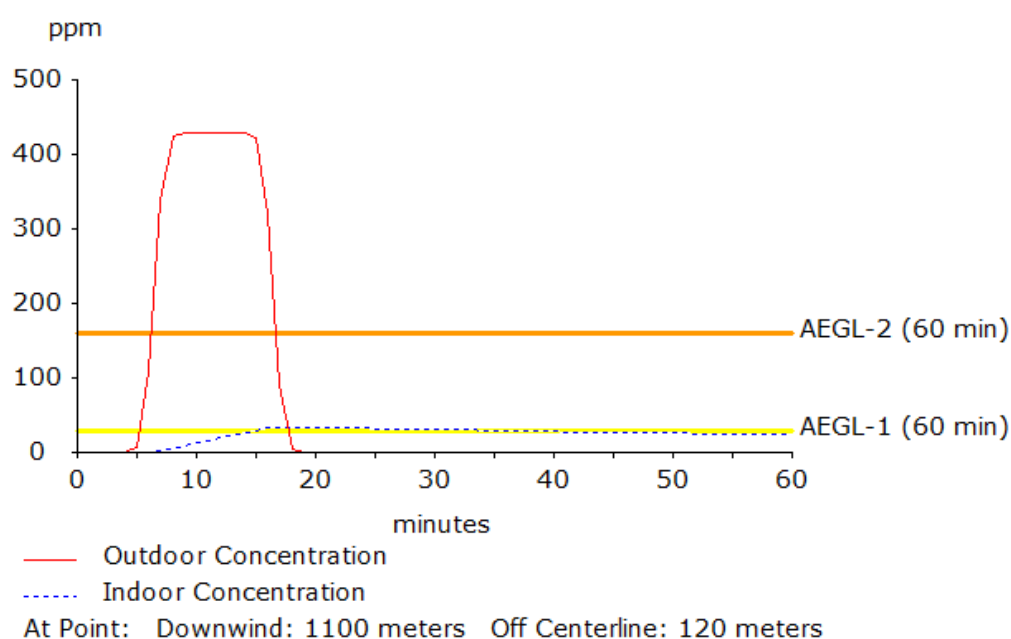


**Figura 41.** Representación de la zona de intervención (3,2 km) y zona de alerta (8,6 km) junto con el radio de evacuación de los 500 individuos (escenario I)

A pesar de que la mitad de los individuos del total de evacuados se situaban en una región muy crítica, uno puede pensar que las consecuencias no fueron tan devastadoras, ya que únicamente se registraron 2 muertos y 46 heridos. Hay una hipótesis a la que se le puede atribuir este resultado. Es importante considerar que el radio de evacuados incluye una región crítica donde se tienen concentraciones por encima de los 1.100 ppm, pero también incluye zonas de posible afectación, alejadas de la dirección que sigue la nube a sotavento, donde las concentraciones pueden ser mucho más pequeñas e incluso imperceptibles para una gran cantidad de personas. Este fenómeno tan evidente se puede observar claramente si se consideran dos puntos de igual radio, pero uno desviado una cierta distancia de la dirección del viento respecto al otro (Figura 42 y 43). Aunque las representaciones ejemplifican dos situaciones al azar, esto es extensible a cualquier otro punto.



**Figura 42.** Perfil concentración – tiempo a una distancia de 1.100 m del punto de fuga bajo la dirección del viento (escenario I)



**Figura 43.** Perfil concentración – tiempo a una distancia de 1.100 m del punto de fuga desviado 120 m de la dirección del viento (escenario I)

Pese a que el registro no informa de cuál era la situación del resto de personas, presumiblemente deberían de encontrarse dentro de un radio de 8,6 km que es la distancia, según las simulaciones, que delimita la zona de alerta y, de acuerdo a su tipología, en la que se espera que las brigadas correspondientes sigan efectuando planes de evacuación.

## **6. Análisis del impacto ambiental**

Pese a que el trabajo tiene un fuerte componente teórico y, por ello, puede dar la sensación de que parte del estudio ambiental pierde cierto interés, es necesario realizar una evaluación detallada de los posibles efectos significativos que el proyecto desarrollado genera sobre el entorno para ponerlos de manifiesto y adoptar, en caso de que sea necesario, las decisiones adecuadas para prevenirlos y minimizarlos. Cabe señalar que, en este caso, la dimensión ambiental del documento únicamente aborda la fase de estudio y simulación de los escenarios seleccionados relativos a fugas tóxicas, puesto que el proyecto se focaliza en esta tarea exclusivamente, sin considerar el impacto ambiental que ocasiona el vertido de esos tóxicos.

### **6.1. Impactos identificados**

Todo impacto ambiental tiene su origen en una causa (en este caso, el proyecto desarrollado) que genera una alteración con incidencia positiva o negativa sobre el medio ambiente. En el proyecto pueden identificarse una serie de impactos potenciales a causa de:

- La propia existencia del proyecto.
- El consumo de una serie de recursos durante la elaboración del trabajo.
- Las emisiones producidas (por ejemplo, contaminantes gaseosos vertidos al medio y/o radiaciones energéticas expedidas a la atmósfera).

### **6.2. Caracterización de los impactos**

Este apartado consiste en presentar una serie de atributos que caracterizan la incidencia sobre el entorno de los impactos identificados previamente. Algunos de los indicadores que se emplean posteriormente durante la evaluación se detallan a continuación (Salvador et al. 2005):

- Signo: positivo o negativo. En función de si el impacto tiene un carácter benéfico o perjudicial sobre el ambiente y la población en general.
- Inmediatez: directo o indirecto. El efecto directo (o primario) tiene una repercusión inmediata en algún factor ambiental, mientras que el indirecto (o secundario) es el que deriva de un efecto primario.
- Momento en que se produce: corto, medio o largo plazo. Efectos a corto, medio o largo plazo es el que se manifiesta en un ciclo anual, antes de cinco años o en un periodo mayor, respectivamente.

- Periodicidad: periódico o de aparición irregular. Efecto periódico es el que se manifiesta de forma cíclica, por su parte, el irregular es el que se manifiesta de forma impredecible en el tiempo.

## 6.3. Impacto ambiental

Una vez identificados los potenciales impactos ambientales durante la elaboración del proyecto, esta sección última sirve para evaluar la incidencia de cada uno de éstos de acuerdo a los indicadores de caracterización, anteriormente presentados, para ver de qué manera se ve afectada el área circundante en relación al medio físico y socioeconómico.

### 6.3.1. Impacto de la existencia del proyecto

Desde un punto de vista socioeconómico el proyecto tiene un impacto positivo. En primer lugar, tanto la información recopilada del análisis de los accidentes históricos, como la simulación de los casos de estudio, permiten identificar factores que pueden ser utilizados para elaborar planes de prevención y emergencia más eficientes, aportando a las brigadas correspondientes una mayor comprensión global y conocimiento en este tipo de escenarios. Por otra parte, los datos obtenidos se pueden emplear como un conjunto de lecciones aprendidas que ayuden a mitigar sucesos con denominadores comunes en el futuro, permitiendo destinar recursos de forma más eficiente a aquellos aspectos que deben ser mejorados o revisados, mejorando así las metodologías relativas a la seguridad y, consecuentemente, minimizando los daños sobre personas, bienes y medio ambiente.

### 6.3.2. Impacto del consumo de recursos

En relación a los insumos o materiales empleados para esta actividad se tienen de varios tipos, todos ellos con un efecto directo sobre el ambiente. Por un lado, el recurso principal, el cual está asociado al consumo de electricidad necesario para hacer funcionar un ordenador y, por otro lado, el recurso de climatización para mantener una condiciones adecuadas en el entorno de trabajo. Adicionalmente, y en cantidades pequeñas, se han empleado recursos relativos a material de oficina como papel, documentos impresos, carpetas, lápices, bolígrafos, etc. Estos últimos recursos, considerados de carácter secundario, se convierten en residuos con un impacto relativo sobre el terreno que debe ser gestionado. De hecho, *El Programa de Gestión de Residuos Municipales de Cataluña* (PROGREMIC), aporta unas pautas para la correcta gestión de este tipo de residuos («Agència de Residus de Catalunya»). Para el caso del papel y documentos impresos, los cuales representan más de un 50% del total de los residuos generados en oficinas y tienen asociados un gran número de impactos sobre el medio ambiente durante todo su ciclo de vida, se establece la recogida selectiva en los contenedores de color azul. El material de escritura y las carpetas, generalmente compuestos por plásticos como el



PVC, el cual tiene efectos nocivos para personas y medio ambiente, debe depositarse, por normal general, en los contenedores resta. Además, parte del trabajo se ha llevado a cabo en las instalaciones del CERTEC (*Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico*), localizado en el Departamento de Ingeniería Química de la EEBE (*Escuela de Ingeniería de Barcelona del Este*), por lo que se considera esta infraestructura como el medio logístico que aporta los recursos anteriormente citados. Las instalaciones se han utilizado durante un periodo de 5 meses, por lo que se considera un impacto ambiental a corto plazo y sin periodicidad en el tiempo, ya que una vez finalizado el proyecto, el impacto ambiental derivado del mismo relativo a estos recursos desaparece.

### **6.3.3. Impacto de las emisiones**

En la cuantificación del impacto de las emisiones globales de gases de efecto invernadero derivadas, por un lado, del uso de maquinaria y tecnología del entorno de trabajo y, por otro, del desplazamiento en tren requerido para desarrollar el proyecto, se ha considerado la generación de CO<sub>2</sub> equivalente (esto permite, a partir de un potencial de calentamiento global, expresar la masa del resto de gases de efecto invernadero por su equivalencia al CO<sub>2</sub>, que es más conocido y se trata del contaminante principal). En este caso, ambas emisiones tienen un efecto negativo y son de carácter indirecto, ya que la primera deriva del consumo de electricidad y la segunda del transporte, cuyo servicio es ofrecido por un tercero. Para el cálculo de las emisiones se ha empleado la herramienta CeroCO2 disponible en la red de forma gratuita («CeroCO2 Actuamos frente al Cambio Climático»). Las consideraciones que se han tenido en cuenta para cada caso se detallan a continuación:

- En relación al consumo eléctrico

Únicamente se considera el uso del ordenador de sobremesa. El proyecto se ha ido elaborando durante un periodo de 5 meses, a una media de 3 horas diarias, lo que da un total de 465 horas. Considerando que el ordenador encendido consume una potencia promedio de 80 W, la energía consumida es de 37,2 kWh. Las emisiones correspondientes son 13,76 kg de CO<sub>2</sub> eq.

- En relación al transporte

La distancia recorrida diariamente entre ida y vuelta es, aproximadamente, 60 km. El viaje en tren se ha realizado 3 días a la semana durante 5 meses. El total de emisiones por desplazamiento terrestre son 107,4 kg de CO<sub>2</sub> eq.



## Conclusiones

Del estudio histórico de los 525 accidentes diferentes sobre fugas tóxicas se esclarecen varios puntos:

- La elaboración de un análisis histórico está condicionada, en gran medida, por el número de accidentes ocurridos que han sido registrados en las bases de datos o recursos de información empleados. Esta información es necesaria para discernir entre los diferentes tipos de accidentes y averiguar aspectos relacionados con ellos.
- El análisis estadístico de la información histórica permite determinar tendencias que pueden servir para la estimación de daños futuros, además de aportar nuevas ideas acerca de las medidas necesarias para prevenir accidentes o mitigar sus efectos. No obstante, debe tenerse en cuenta que ciertas condiciones de operación o características de construcción que en el pasado dieron lugar a un determinado suceso, pueden no tener nada que ver con el presente o futuro más inmediato, por lo que los datos relativos a accidentes antiguos deben interpretarse con prudencia.
- En cuanto a las bases de datos empleadas, éstas presentan ciertas limitaciones relacionadas con las características de la información almacenada. En los últimos 40 años se concentra el mayor número de accidentes que involucran fugas tóxicas (80%), pero estos datos no necesariamente deben interpretarse como que en el pasado no ocurrían prácticamente accidentes, sino más bien ponen de manifiesto la ausencia de información de accidentes ocurridos en esos años anteriores.
- Del análisis realizado, la siguiente información es probablemente la más destacable: el factor humano (34%) es la causa más frecuente de fuga tóxica, seguida del fallo mecánico (32%), sobre todo en plantas de proceso y operaciones de transporte. Destinar esfuerzos a mejorar la formación de los empleados se antoja fundamental si se quiere aumentar la seguridad de estos procedimientos. El análisis también muestra que debería realizarse un esfuerzo en mejorar la seguridad en zonas urbanas, dado que las fugas tóxicas suelen tener una mayor incidencia sobre estas regiones más pobladas. Aunque hay una gran variedad de sustancias tóxicas implicadas en este tipo de incidentes, el binomio más importante lo conforman el amoníaco y el cloro (su contribución conjunta es del 33% respecto al total). A nivel de consecuencias, las fugas tóxicas suelen implicar un mayor porcentaje de heridos que de muertos. Esto puede atribuirse a que tienen un radio de afectación muy elevado, pero únicamente los individuos situados en posiciones críticas son los que padecen los efectos más graves. Por su parte, la existencia de una gran cantidad de registros que implican personas evacuadas muestra la importancia que tienen los planes de evacuación de las brigadas correspondientes en este tipo de incidentes.

En cuanto a la evaluación de las metodologías de zonificación se puede decir que:

- Los resultados estimados de la modelización de los casos seleccionados están en relativa consonancia con los registros reales del caso. Por tanto, la utilización de un software de probada eficacia científica como ALOHA se convierte en una herramienta interesante en la determinación de zonas de amenaza, sobre todo como complemento en el campo del riesgo, para un mejor desarrollo de las estrategias de prevención y planes de evacuación.
- La dispersión de una nube tóxica está fuertemente influenciada por las condiciones atmosféricas reinantes. A nivel comparativo, todos los casos simulados bajo las condiciones meteorológicas del escenario II (situación más desfavorable) presentan distancias de afectación más grandes. Por su parte, el grado de contaminación de la nube está directamente relacionado con la cantidad vertida a la atmósfera.
- El confinamiento es una medida de protección pasiva muy importante en accidentes que involucran fugas tóxicas, reduciendo significativamente los efectos directos sobre personas.
- Las distancias de planificación obtenidas de las simulaciones correspondientes a los índices AEGL-2 y AEGL-1 son útiles en la elaboración de planes de emergencia, tanto para niveles de riesgo elevado en los que se requiere una acción inmediata (zona de intervención) como para niveles de advertencia (zona de alerta). Sin embargo, los parámetros meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, la estabilidad atmosférica, etc., añaden incertidumbre al problema, afectando de manera importante a las distancias previstas y a la extensión real de las zonas vulnerables. Por tanto, deben tenerse en consideración antes de lanzar medidas de emergencia por parte de las autoridades competentes.
- La metodología adoptada para la determinación de las zonas de alerta e intervención presenta como principal limitación la distancia máxima de cálculo (10 km) y el tiempo máximo transcurrido desde el inicio de la fuga (1 hora), ya que más allá de esos puntos el programa no da representaciones gráficas por no ser capaz de predecir el comportamiento del viento. Esto se traduce en que no tiene aplicabilidad para circunstancias en las que las cantidades vertidas a la atmósfera sean muy elevadas, puesto que estas situaciones, casi con total seguridad, implican nubes tóxicas que se extienden hasta regiones más allá de los límites de ALOHA.

## Presupuesto y/o Análisis Económico

En este análisis económico se desglosan los costes del proyecto en dos direcciones: costes asociados al personal y costes relativos al material empleado.

### Costes del personal

En primer lugar, en relación a los costes del personal, se ha considerado, por un lado, la mano de obra implicada para satisfacer el alcance del proyecto y, por otro, el tiempo invertido para completarlo.

El proyecto, en su totalidad, ha sido realizado por una única persona con la titulación de ingeniero químico. La retribución puede variar en función de la tarea que desempeña y su grado de experiencia, pero se asume un sueldo aproximado de 12 €/h correspondiente al sueldo medio de un técnico de estas características. La revisión y corrección de la memoria se ha llevado a cabo por otra persona externa, Doctora Ingeniera Industrial, con un salario ajustado de 40 €/h, dado su alto conocimiento y experiencia profesional en el sector. En la Tabla 29 se muestra el desglose definitivo de los costes asociados a los recursos humanos que han intervenido.

**Tabla 29.** Desglose económico asociado al personal

Personal	Salario [€/h]	Tarea desempeñada	Horas dedicadas	Coste [€]
Ingeniero Químico	12	Estudio bibliográfico y recopilación de accidentes	130	1.560
		Análisis histórico	35	420
		Selección de casos de estudio	30	360
		Estudio de la legislación	10	120
		Simulación de casos	50	600
		Elaboración de la memoria	210	2.520
Doctora Ingeniera Industrial	40	Orientación y revisión de la memoria	20	800
<b>TOTAL</b>			<b>485</b>	<b>6.380</b>

### Costes del material

Todos los recursos materiales empleados durante el proyecto están asociados al lugar de trabajo donde se ha llevado a cabo la actividad en cuestión. Las actividades relacionadas con la obtención de información de la base de datos MHIDAS se ha efectuado con una versión ejecutable en CD-ROM perteneciente al grupo de investigación del CERTEC (*Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico*) de la Universidad Politécnica de Cataluña. El resto de bases de datos y fuentes de información consultadas han sido de libre acceso, por lo que no presentan ningún coste imputable. El equipo empleado durante

el transcurso del proyecto ha estado constituido por dos ordenadores: uno de uso personal (Microsoft® Windows 10) y otro perteneciente a la institución citada (Microsoft® Windows 7 Professional). Las licencias del sistema operativo relativas a cada equipo computan dentro del coste de adquisición del ordenador en cuestión. Cada ordenador se ha considerado que tiene un periodo de amortización de 5 años, teniendo en cuenta el tiempo medio de obsolescencia de este tipo de unidades, y que ha sido utilizado durante 5/12 años. En lo relativo al programa empleado para la simulación de los casos de estudio, ALOHA es un software libre, por lo que no tiene contribución alguna en el coste material. Además, cada uno de los ordenadores estaba provisto de una licencia de Microsoft Office. No se tienen cuenta los costes eléctricos relativos al uso de este tipo de unidades por su baja contribución. En la Tabla 30 se muestran todos los costes materiales recopilados.

**Tabla 30.** Desglose económico asociado a los costes materiales

Categoría	Cantidad	Coste unitario [€]	Coste [€]
MHIDAS CD-ROM	1	0	0
Ordenador	2	1.000	166,67
Microsoft Office	2	250	500
ALOHA	2	0	0
<b>TOTAL</b>			<b>666,67</b>

## Costes totales

A continuación se muestran los costes totales asociados a la finalización del proyecto:

**Tabla 31.** Costes totales del proyecto

Tipo de coste	Coste [€]
Personal	6.380
Material	666,67
<b>TOTAL</b>	<b>7.046,67</b>

## Bibliografia

*Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals - Ammonia.*, 2007. ISBN 9780309112130.

Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals - Chlorine. En: [en línea]., 2016. ISBN 978-0-309-44915-1. DOI 10.17226/23634. Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/23634>.

Agència de Residus de Catalunya. En: [en línea]. [consulta: 17 mayo 2018]. Disponible en: <http://residus.gencat.cat/ca/inici/>.

ALOHA User's Manual | NEPIS | US EPA. En: [en línea]., 2007. [consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: [https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1003UZB.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011 Thru 2015%7C1995 Thru 1999%7C1981 Thru 1985%7C2006 Thru 2010%7C1991 Thru 1994%7C1976 Thru 1980%7C2000 Thru 2005%7C1986 Thru 1990%7C](https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1003UZB.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011%7C1995%7C1999%7C1981%7C1985%7C2006%7C1991%7C1994%7C1976%7C1980%7C2000%7C1986%7C1990%7C).

American Institute of Chemical Engineers., J.G., 1970. *Ammonia plant safety (and related facilities)*. [en línea]. American Institute of Chemical Engineers. [consulta: 13 abril 2018]. Disponible en: <https://www.tib.eu/en/search/id/ceaba%3ACEAB1970042113/Ammonia-storage-tank-repair/>.

American Institute of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety., 1993. *Guidelines for engineering design for process safety*. [en línea]. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. ISBN 0816905657. [consulta: 8 febrero 2018]. Disponible en: [https://books.google.es/books/about/Guidelines\\_for\\_engineering\\_design\\_for\\_pr.html?id=EcRTAAAMAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.es/books/about/Guidelines_for_engineering_design_for_pr.html?id=EcRTAAAMAAJ&redir_esc=y).

AMMONIA, ANHYDROUS | CAMEO Chemicals | NOAA. En: [en línea]. [consulta: 31 mayo 2018]. Disponible en: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/4860>.

Annick, L. et al., 2017. Assessment of CO<sub>2</sub>Health Risk in Indoor Air Following a Leakage from a Geological Storage: Results from the First Representative Scale Experiment. En: *Energy Procedia* [en línea]. The Author(s), Vol. 114, no. November 2016, p. 4287-4302. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.03.1573. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1573>.

Badoux, R.A.J., 1985. Some experiences of a consulting statistician in industrial safety and reliability. En: *Reliability Engineering* [en línea]. Elsevier, Vol. 10, no. 4, p. 219-232. ISSN 0143-8174. DOI 10.1016/0143-8174(85)90006-X. [consulta: 6 abril 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/recursos.biblioteca.upc.edu/science/article/pii/014381748590006X>.

Blanc, P.D., 2007. *How everyday products make people sick : toxins at home and in the workplace* [en línea]. University of California Press. ISBN 9780520248816. [consulta: 13 abril 2018]. Disponible en: [https://books.google.es/books?id=HlfN3xt8KZAC&pg=PA303&lpg=PA303&dq=joyner+and+durel+accidental+liquid+chlorine+spill+in+a+rural+community&source=bl&ots=SauPriJ6e8&sig=cVRkGTStgjhFOVvhmYUjhMWJ47g&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiRnOnq5bfaAhUIVBQKHxz7Aq4Q6AEIPTAD#v=onepage&q=joyner and durel accidental liquid chlorine spill in a rural community&f=false](https://books.google.es/books?id=HlfN3xt8KZAC&pg=PA303&lpg=PA303&dq=joyner+and+durel+accidental+liquid+chlorine+spill+in+a+rural+community&source=bl&ots=SauPriJ6e8&sig=cVRkGTStgjhFOVvhmYUjhMWJ47g&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiRnOnq5bfaAhUIVBQKHxz7Aq4Q6AEIPTAD#v=onepage&q=joyner+and+durel+accidental+liquid+chlorine+spill+in+a+rural+community&f=false).

Brief, A.A., 2002. National Transportation Safety Board, p. 1-2.



Carol, S., Vilchez, J.-A. y Casal, J., 2000. Updating the economic cost of large-scale industrial accidents: Application to the historical analysis of accidents. En: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [en línea]. Vol. 13, no. 1, p. 49-55. ISSN 0950-4230. DOI 10.1016/S0950-4230(99)00053-4. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TGH-3YB1W6R-7/2/230bf0749cff90b863c428f511c9cc34>.

Casal, J. et al., 1999. *Análisis del riesgo en instalaciones industriales* [en línea]. UPC. ISBN 9788483012277. [consulta: 8 febrero 2018]. Disponible en: <https://www.casadellibro.com/libro-analisis-del-riesgo-en-instalaciones-industriales/9788483012277/754833>.

Casal, J., 2008. *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*. ISBN 9780444638830.

CeroCO2 Actuamos frente al Cambio Climático. En: [en línea]. [consulta: 18 mayo 2018]. Disponible en: <http://www.ceroco2.org/>.

Chakrabarti, U.K. y Parikh, J.K., 2011. Class-2 hazmat transportation consequence assessment on surrounding population. En: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 24, no. 6, p. 758-766. ISSN 09504230. DOI 10.1016/j.jlp.2011.04.011. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.04.011>.

Chen, H. et al., 2015. Integration of process safety engineering and fire protection engineering for better safety performance. En: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 37, p. 74-81. ISSN 09504230. DOI 10.1016/j.jlp.2015.06.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.013>.

Chlorine, CAS No 7782-50-5 Chlorine. En: [en línea]. [consulta: 21 mayo 2018]. Disponible en: <http://www.chemnet.com/cas/en/7782-50-5/Chlorine.html>.

Comisión Europea, 1982-2012. En: [en línea]. [consulta: 15 junio 2018]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/seveso/>.

Computer Aided Management of Emergency Operations | NOAA. En: [en línea]. [consulta: 27 marzo 2018]. Disponible en: <https://cameochemicals.noaa.gov/>.

Concerned, I., 2007. Rupture of a cryogenic ammonia tank March 20th 1989 Jonova Lithuania ( USSR ), p. 1-4.

Conway, Kansas, United States of America Historical Weather Almanac. En: [en línea]. [consulta: 25 mayo 2018]. Disponible en: <https://www.worldweatheronline.com/conway-weather-history/arkansas/us.aspx>.

Darbra, R.M. y Casal, J., 2004. Historical analysis of accidents in seaports. En: *Safety Science*. Vol. 42, no. 2, p. 85-98. ISSN 09257535. DOI 10.1016/S0925-7535(03)00002-X.

Eckerman, I., 2005. The Bhopal gas leak: Analyses of causes and consequences by three different models. En: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 18, no. 4-6, p. 213-217. ISSN 09504230. DOI 10.1016/j.jlp.2005.07.007.



EUROPA - eMARS Dashboard - European Commission. En: [en línea]. [consulta: 1 junio 2018]. Disponible en: <https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content/>.

Factsonline: chemical and industrial accident database. En: [en línea]. [consulta: 1 junio 2018]. Disponible en: <http://www.factsonline.nl/>.

Generalitat de Catalunya., 2008. Instrucció 14/2008 SIE. Criteris per la realització de les anàlisis quantitatives de risc a Catalunya ( PURPLE BOOK I CRITERIS COMPLEMENTARIS ), p. 1-38.

Griffiths, R.F. y Kaiser, G.D., 1982. Production of dense gas mixtures from ammonia releases - A review. En: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 6, no. 1-2, p. 197-212. ISSN 03043894. DOI 10.1016/0304-3894(82)80040-X.

Guía técnica de Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II]). En: [en línea]. [consulta: 26 abril 2018]. Disponible en: [http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/gt\\_zppagtt\\_presen.htm](http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/gt_zppagtt_presen.htm).

Hauer, E. y Hakkert, A.S., 1988. *Extent and some implications of incomplete accident reporting*.

Havens, J. y Spicer, T., 1985. Development of an Atmospheric Dispersion Model for Heavier-Than-Air Gas Mixtures. Volume 3. DEGADIS User's Manual.

Hegler, C., 1928. *On the Mass Poisoning by Phosgene Gas in Hamburg. Chemical Observations*. [en línea]. G. Thieme. [consulta: 20 abril 2018]. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19292701557>.

Honourable, T.H.E. et al., 1981. *REPORT O F THE MISSISSAUGA RAILWAY ACCIDENT INQUIRY*. ISBN 0660108143.

Jones, R., W. Lehr, D. Simecek-Beatty, R.M.R., 2013. ALOHA (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres): Technical Documentation. En: . no. November.

Kaiser, G.D. y Griffiths, R.F., 1982. The Accidental Release of Anhydrous Ammonia to the Atmosphere: A Systematic Study of Factors Influencing Cloud Density and Dispersion. En: *Journal of the Air Pollution Control Association*. Vol. 32, no. 1, p. 66-71. ISSN 00022470. DOI 10.1080/00022470.1982.10465371.

Kim, J., Jung, E. y Kang, S., 2015. Large eddy simulation of hydrogen dispersion from leakage in a nuclear containment model. En: *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 40, no. 35, p. 11762-11770. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2015.04.156. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.156>.

Kukkonen, J. et al., 1993. Long-range transport of ammonia released in a major chemical accident at Ionava, Lithuania. En: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 35, no. 1, p. 1-16. ISSN 03043894. DOI 10.1016/0304-3894(93)85020-F.

Lane, D.A. y Thomson, B.A., 1981. Monitoring a chlorine spill from a train derailment. En: *Journal of the Air Pollution Control Association*. Vol. 31, no. 2, p. 122-127. ISSN 00022470. DOI 10.1080/00022470.1981.10465198.

Lees, Frank., 1996. Loss Prevention in the Process Industries. En: [en línea]. Vol. Volumen 2, p. 1302. Disponible en: [https://s3-ap-southeast-1.amazonaws.com/erbuc/files/5495\\_a38cc050-75b8-43c6-9ac7-57ab7b72ef50.pdf](https://s3-ap-southeast-1.amazonaws.com/erbuc/files/5495_a38cc050-75b8-43c6-9ac7-57ab7b72ef50.pdf).

Lees, F., 2012. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. En: . Vol. 1, p. 3776. DOI 10.1016/C2009-0-24104-3.

Lees, Frank P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries Volume 3.

Levenspiel, O., 1993. *Flujo de fluidos e intercambio de calor* [en línea]. Reverté. ISBN 9788429179682. [consulta: 24 septiembre 2017]. Disponible en: <https://www.casadellibro.com/libro-flujo-de-fluidos-e-intercambio-de-calor/9788429179682/377471>.

Mahindru, S.N. (Som N., 2004. *Food contaminants : origin, propagation and analysis* [en línea]. A.P.H. Pub. Corp. ISBN 9788176485258. [consulta: 13 abril 2018]. Disponible en: [https://books.google.es/books?id=yg4P9TUoz4C&pg=PA4&lpg=PA4&dq=montana+mexico+1981+chlorine&source=bl&ots=NVt\\_qQWU2V&sig=8ZAJDHZcj6R1pqbHbedmJ9WExi4&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjC6uu03LfaAhUHvhQKHZABA SIQ6AEISDAK#v=onepage&q=montana mexico 1981 chlorine&f=false](https://books.google.es/books?id=yg4P9TUoz4C&pg=PA4&lpg=PA4&dq=montana+mexico+1981+chlorine&source=bl&ots=NVt_qQWU2V&sig=8ZAJDHZcj6R1pqbHbedmJ9WExi4&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjC6uu03LfaAhUHvhQKHZABA SIQ6AEISDAK#v=onepage&q=montana mexico 1981 chlorine&f=false).

Medel, S.E.G., 2006. Second report of the Advisory Committee on Major Hazards. En: *Vacuum*. no. February, p. 1-34.

MHIDAS., 2007. *Major Hazardous Incident Data Service, OHS\_ROM, Reference Manual*.

MIYAGAWA, M., 2010. *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) and its Implementation in Japan* [en línea]. ISBN 9211169577. DOI 10.1265/jjh.65.5. Disponible en: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjh/65/1/65\\_1\\_5/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjh/65/1/65_1_5/_article/-char/ja/).

NTSB-RAR-78-4., 1978. *Railroad Accident Report: Louisville and Nashville Railroad Company Freight Train Derailment and Puncture of Anhydrous Ammonia Tank Cars at Pensacola, Florida, November 9, 1977*.

Orvar Andersson, B., 1989. Lithuanian ammonia accident, March 20th 1989. En: . no. 124, p. 4-6.

Pasquill, F., 1961. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteorological Management. 90 (1), 33 - 49. 1961. En: [en línea]. [consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022250961800071>.

Pensacola, Florida, United States of America Historical Weather Almanac. En: [en línea]. [consulta: 26 mayo 2018]. Disponible en: <https://www.worldweatheronline.com/pensacola-weather-history/florida/us.aspx>.

Perry, R., Green, D. y Maloney, J., 1997. *Perry's chemical engineers' handbook* [en línea]. ISBN 0070498415. DOI 10.10360071422943. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed027p533.1%5Chttp://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?ouvrage=1037804>.

Planas, E. et al., 2014. Historical evolution of process safety and major-accident hazards prevention in Spain. Contribution of the pioneer Joaquim Casal. En: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 28, p. 109-117. ISSN 09504230. DOI 10.1016/j.jlp.2013.04.005. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2013.04.005>.

Port Barre, Louisiana, United States of America Historical Weather Almanac. En: [en línea]. [consulta: 21 mayo 2018]. Disponible en: <https://www.worldweatheronline.com/port-barre-weather-history/louisiana/us.aspx>.

RD 1254 1999.Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. En: *Boletín Oficial del Estado*. no. 20 de julio de 1999 (172), p. 27167-27180.

Renjith, V.R. y Madhu, G., 2010. Individual and societal risk analysis and mapping of human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of an industrial area. En: *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 1, no. 1, p. 135-148. ISSN 0976-4259.

Roy, J. y Durel, E., 1962. Accidental Liquid Chlorine Spill in a Rural Community : *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. En: [en línea]. [consulta: 13 abril 2018]. Disponible en: [https://journals.lww.com/joem/citation/1962/03000/accidental\\_liquid\\_chlorine\\_spill\\_in\\_a\\_rural.7.aspx](https://journals.lww.com/joem/citation/1962/03000/accidental_liquid_chlorine_spill_in_a_rural.7.aspx).

*Safety Recommendation R-78-057* [en línea]. [consulta: 13 abril 2018]. Disponible en: [https://www.nts.gov/about/employment/\\_layouts/nts.recsearch/Recommendation.aspx?Rec=R-78-057](https://www.nts.gov/about/employment/_layouts/nts.recsearch/Recommendation.aspx?Rec=R-78-057).

Salvador, A.G. et al., 2005. Evaluación de impacto ambiental.

Sinnott, R.K., 2013. Coulson & Richardson's Chemical Engineering Volume 6: Chemical Engineering Design. En: *Book* [en línea]. Vol. 6, p. 1038. DOI 10.1016/B978-0-08-096659-5.00019-5. Disponible en: <http://books.google.com/books?id=kg8dJgAACAAJ&printsec=frontcover>.

The ARIA Database – La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques. En: [en línea]. [consulta: 1 junio 2018]. Disponible en: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/the-aria-database/?lang=en>.

Tong, X. et al., 2017. A modeling method for predicting the concentration of indoor carbon dioxide leakage and dispersion based on similarity theory. En: *Energy and Buildings* [en línea]. Elsevier B.V., Vol. 151, p. 585-591. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.07.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.001>.

US EPA, O.Ammonia Results - AEGL Program. En: [en línea]. [consulta: 31 mayo 2018 a]. Disponible en: <https://www.epa.gov/aegl/ammonia-results-aegl-program>.

US EPA, O.Chlorine Results - AEGL Program. En: [en línea]. [consulta: 21 mayo 2018 b]. Disponible en: <https://www.epa.gov/aegl/chlorine-results-aegl-program>.

Vílchez, J.A. et al., 1995. Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. En: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 8, no. 2, p. 87-96. ISSN 09504230. DOI 10.1016/0950-4230(95)00006-M.



Zhang, Y., Oldenburg, C.M. y Pan, L., 2016. Fast estimation of dense gas dispersion from multiple continuous CO<sub>2</sub> surface leakage sources for risk assessment. En: *International Journal of Greenhouse Gas Control* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 49, p. 323-329. ISSN 17505836. DOI 10.1016/j.ijggc.2016.03.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.03.002>.

## Anexo

### A1. Campos de interés. Procedimiento seguido en ALOHA

#### SITEDATA

##### **Localización geográfica del accidente**

El primer paso en el proceso de simulación es definir la ubicación del accidente. ALOHA dispone de una base de datos integrada con las ciudades más importantes de los Estados Unidos, con datos de latitud, longitud, altitud y zona horaria para cada una de ellas. Estos datos son utilizados para estimar la radiación solar y presión ambiente local. Si el escenario creado pertenece a una ciudad fuera de los EEUU, es posible crearlo introduciendo los datos pertinentes para la nueva localización geográfica.

##### **Tipo de edificio**

Una vez se ha definido la ubicación del accidente, se fija, en caso de haberlo, el tipo de edificio/estructura situado en las inmediaciones que se encuentre involucrado. Distingue entre edificios completamente cerrados, edificio de una sola planta y edificios de dos plantas. Además, se puede seleccionar el tipo de entorno: completamente desprotegido o protegido por árboles, arbustos, etc.

##### **Fecha y hora**

La introducción de la hora del accidente, junto con la localización geográfica previamente definida, sirve para calcular la altura solar, necesaria para que el programa establezca la clase de estabilidad atmosférica (aunque para ello también es necesario definir el resto de condiciones atmosféricas, comentadas más adelante).

##### **Sustancia involucrada**

Respecto a la sustancia que participa en el accidente, ALOHA incluye una gran base de datos con cientos de compuestos puros especificando propiedades físicas, químicas y toxicológicas (especialmente para sustancias que pueden verse potencialmente involucradas en fugas accidentales y generar entornos tóxicos o de amenaza por incendios y explosiones). Dentro de la información toxicológica relativa a cada sustancia, el programa emplea una serie de umbrales (*Levels of Concern*, LOC) para evaluar el impacto sobre la salud de las personas expuestas a cualquiera de estos tóxicos durante un periodo de tiempo concreto (Jones, R., W. Lehr, D. Simecek-Beatty 2013). Algunos de los

límites más importantes, desde el punto de vista de riesgo de inhalación de tóxicos, son los citados con anterioridad en el apartado 4.2.

Los productos químicos que se incluyen en la base de datos de ALOHA son un subconjunto de los que se pueden encontrar en CAMEO Chemicals («Computer Aided Management of Emergency Operations | NOAA»), una base de datos de sustancias químicas peligrosas compilada y mantenida por la NOAA y la EPA. También es posible introducir sustancias que no consten en la base de datos interna del programa. La forma de hacerlo es bastante intuitiva y se realiza mediante el cuadro de diálogo que se muestra en la Figura A1.1.

**Figura A1.1.** Cuadro de propiedades solicitadas para registrar una sustancia nueva

### Condiciones meteorológicas

Finalmente, la última etapa de este punto es la correspondiente a la definición de las condiciones meteorológicas que prevalecen en el momento del accidente, ya que éstas influyen en la dispersión de la nube tóxica. En este apartado se tienen en cuenta factores de la dinámica atmosférica que afectan de forma significativa sobre la dispersión, en términos de persistencia y alcance de la nube de gas, como son la velocidad y dirección del viento, la rugosidad del terreno, la turbulencia atmosférica y la cobertura del cielo. Estas entradas, junto con la información introducida anteriormente por el usuario relativa a la fecha, hora y localización del accidente, se emplea para determinar el tipo de estabilidad (en caso de que haya más de una clase de estabilidad para las condiciones indicadas, ALOHA selecciona la más estable). El tipo de estabilidad tiene un efecto importante en la predicción que hace el programa sobre el tamaño de la zona de amenaza («ALOHA User's Manual | NEPIS | US EPA» 2007). El método seguido por ALOHA para caracterizar los diferentes grados de turbulencia atmosférica y seleccionar una estabilidad acorde es el de Pasquill-Gifford-Turner, constituido por seis clases diferentes, de la A a la F (Pasquill 1961). También se da la posibilidad al usuario de especificar directamente la estabilidad

en caso de que ésta sea conocida. Por último, se define la temperatura del aire, la existencia o no de capa de inversión térmica y la humedad. Estos últimos aspectos tienen menos efecto sobre el desplazamiento de la nube, excepto la inversión térmica que sí puede tener un papel fundamental en la dispersión de la nube de gas en la atmósfera.

## **SETUP**

Una vez han sido establecidas adecuadamente las variables de entrada del escenario, es necesario definir el modelo físicamente.

### **Modelos para el cálculo del término fuente**

La velocidad a la que una sustancia química se transporta a través del aire es un aspecto crítico para el tamaño y la duración de la nube tóxica. Para describir los efectos de este comportamiento y estimar la velocidad a la que un producto químico es liberado del confinamiento y vertido a la atmósfera, ALOHA emplea cuatro modelos conocidos como “*Source Strength Models*” (Jones, R., W. Lehr, D. Simecek-Beatty 2013):

- Directo: una liberación instantánea o continua desde un único punto en el espacio de vapores químicos en el aire. Este caso se utiliza cuando el usuario conoce la cantidad o caudal emitido. Es la única opción que permite una liberación elevada.
- Charco: permite modelar la evaporación de un compuesto volátil desde un charco de área constante. El modelo utilizado para encontrar la tasa de evaporación depende de si el charco contiene un líquido a la temperatura de ebullición o no. Para líquidos en ebullición el mecanismo que controla es la transferencia de calor del suelo hacia el líquido, definido por el balance de energía. Sin embargo, los líquidos que no hierven están gobernados principalmente por la velocidad del viento, el área del charco y el gradiente de presiones entre la presión de vapor del líquido (presión parcial en caso de mezclas) y la atmosférica.
- Tanque: se utiliza para modelar la cantidad de sustancia vertida a la atmósfera cuando se produce la ruptura de un tanque. El programa puede tratar tanques que contienen gases presurizados, líquidos a presión ambiente y gases licuados bajo presión. La velocidad de liberación desde el tanque depende del estado físico de la sustancia (líquido, gas o mezcla de fases), de la geometría del tanque y de la situación y forma del orificio.
- Tubería: el modelo de resolución para fugas en tuberías, bien conectadas a un depósito o bien desconectadas de cualquier recipiente de almacenamiento, sólo considera la liberación de gases puros. El algoritmo de cálculo se basa en la consideración de que la transferencia de calor hacia el gas en movimiento a través de las paredes de la tubería mantiene unas condiciones casi isotérmicas en toda la longitud, excepto cerca del final de la tubería donde el flujo se supone adiabático debido a la gran aceleración.





Sea cual sea el modelo empleado, su duración queda limitada a, como máximo, una hora (la duración más pequeña permitida es un minuto). En la mayoría de los casos, la intensidad de la emisión varía constantemente durante el tiempo que dura la fuga, así que ALOHA aproxima las emisiones variables a pequeños estados estacionarios de intervalos muy cortos.

### **Métodos de análisis de la dispersión**

La elección del método de solución corresponde a la última etapa del *solver* del programa. Para este algoritmo de cálculo ALOHA contiene dos modelos de dispersión: el Gaussiano y el empleado para Gases Pesados. Los modelos de dispersión de aire se centran en predecir las zonas de peligro asociadas con nubes de gas tóxicas o inflamables. Estos modelos se utilizan para predecir cómo varía la concentración de contaminante con el tiempo y la posición una vez se ha producido la fuga a la atmósfera. El modelo Gaussiano se utiliza para describir la dispersión de gases neutros (aquellos con densidades próximas a la del aire) y es más apropiado para nubes de contaminantes que no están directamente afectadas por la gravedad. La ecuación del modelo describe una campana de Gauss, con un pico de concentración máxima. A medida que el penacho se va alejando, la curva Gaussiana se va achatando, entonces la concentración máxima va disminuyendo y se produce una mayor dispersión. Por su parte, para el cálculo de la dispersión de Gases Pesados, el modelo que utiliza ALOHA es una simplificación del modelo DEGADIS (Havens y Spicer 1985). La utilización de este modelo es más recomendable para casos en los que las nubes tóxicas presenten densidades más grandes que las del aire y estén afectadas de forma significativa por la gravedad. Al tratarse de gases pesados, estos tienden a moverse a ras de suelo. A medida que la nube se va diluyendo y moviendo en la dirección del viento, se va estratificando y expandiendo horizontalmente a causa de la gravedad, entonces empieza a mezclarse con el aire y su comportamiento tiende a gas neutro (esto sucede cuando la concentración de gas en el aire es inferior al 1%).





## A2. Ficha de seguridad del cloro

CLORO		ICSC: 0126 Marzo 2009	
CAS: 7782-50-5 RTECS: FO2100000 NU: 1017 CE Índice Anexo I: 017-001-00-7 CE / EINECS: 231-959-5		<div><div></div><div><math>Cl_2</math> Masa molecular: 70.9</div></div>	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible pero facilita la combustión de otras sustancias. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	NO poner en contacto con materiales incompatibles (ver Peligros Químicos).	En caso de incendio en el entorno: usar un medio de extinción adecuado.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión (ver Peligros Químicos).	NO poner en contacto con materiales incompatibles (ver Peligros Químicos).	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua pero NO en contacto directo con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS!
Inhalación	Tos. Dolor de garganta. Jadeo. Sibilancia. Dificultad respiratoria. Síntomas no inmediatos (ver Notas).	Protección respiratoria. Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio y reposo. Posición de semiincorporado. Proporcionar asistencia médica. Respiración artificial si estuviera indicada. Ver Notas.
Piel	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN. Enrojecimiento. Sensación de quemazón. Dolor. Quemaduras cutáneas.	Guantes aislantes del frío. Traje de protección.	Aclarar con agua abundante durante 15 minutos como mínimo, después quitar la ropa contaminada y aclarar de nuevo. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Lacrimógeno. Enrojecimiento. Dolor. Quemaduras.	Pantalla facial y protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad). Proporcionar asistencia médica inmediatamente.
Ingestión		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Protección personal: traje hermético de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración. Ventilar. Cerrar la botella, si es posible; aislar y ventilar el área hasta que el gas se disperse. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. Eliminar el gas con agua pulverizada. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente.		Botella especial con aislamiento. Contaminante marino. Clasificación UE Símbolo: T, N R: 23-36/37/38-50 S: (1/2)-9-45-61 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.3 Riesgos Subsidiarios de las NU: 8 Clasificación GHS Peligro Contiene gas a presión; puede explotar si se calienta. Mortal si se inhala el gas. Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares. Puede provocar irritación respiratoria. Puede causar daños en los pulmones en caso de una exposición prolongada o repetida, si es inhalado. Muy tóxico para los organismos acuáticos.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Código NFPA: H4; F0; R0; OX		A prueba de incendio, si está en local cerrado. Medidas para contener el efuente de extinción de incendios. Separado de alimentos y piensos (Ver Peligros Químicos). Mantener en lugar fresco, seco y bien ventilado. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2009			
<div><div></div><div></div><div></div></div>			

CLORO		ICSC: 0126
DATOS IMPORTANTES		
<b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Gas licuado en estado comprimido, de color entre verde y amarillo, y de olor acre.		<b>VÍAS DE EXPOSICIÓN</b> Efectos locales graves
<b>PELIGROS FÍSICOS</b> El gas es más denso que el aire.		<b>RIESGO DE INHALACIÓN</b> Al producirse una pérdida de gas, se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.
<b>PELIGROS QUÍMICOS</b> La disolución en agua es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva. La sustancia es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores. La sustancia reacciona con la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos, causando peligro de incendio y explosión. Ataca a los metales, algunos tipos de plásticos, caucho y revestimientos.		<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN</b> Lacrimógeno. La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La inhalación puede originar reacciones asmáticas, neumonitis y edema pulmonar, pero sólo tras producirse los efectos corrosivos iniciales en los ojos o las vías respiratorias. (Ver Notas). La exposición puede producir la muerte.
<b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN</b> TLV: 0.5 ppm como TWA, 1 ppm como STEL; A4 (no clasificable como cancerígeno humano); (ACGIH 2009). LEP UE: 0.5 ppm, 1.5 mg/m <sup>3</sup> como STEL (EU 2006).		<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA</b> La sustancia puede afectar al tracto respiratorio y a los pulmones, dando lugar a inflamaciones crónicas y alteraciones funcionales. La sustancia puede afectar a los dientes, dando lugar a erosión dental.
PROPIEDADES FÍSICAS		
Punto de ebullición: -34°C Punto de fusión: -101°C Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 0.7 Presión de vapor, kPa a 20°C: 673 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.5		
DATOS AMBIENTALES		
La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente.		
NOTAS		
Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles. Debe considerarse la inmediata administración de un aerosol adecuado por un médico o persona por él autorizada. La alerta por el olor cuando se supera el límite de exposición es insuficiente. NO utilizar cerca de un fuego, de una superficie caliente o mientras se trabaja en soldadura. NO pulverizar con agua sobre la botella que tenga un escape (para evitar la corrosión de la misma). Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
Límites de exposición profesional (INSHT 2011): VLA-EC: 0,5 ppm, 1,5 mg/m <sup>3</sup>		
<b>NOTA LEGAL</b>		Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.
© IPCS, CE 2009		


### A3. Ficha de seguridad del amoniaco

**AMONIACO (ANHIDRO)**
**ICSC: 0414**






**AMONIACO (ANHIDRO)**  
 Trihidruro de nitrógeno  
 $\text{NH}_3$   
 Masa molecular: 17.03

Nº CAS 7664-41-7  
 Nº RTECS BO0875000  
 Nº ICSC 0414  
 Nº NU 1005  
 Nº CE 007-001-00-5



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	En caso de incendio en el entorno: usar medio de extinción adecuado.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones.	En caso de incendio: mantener fría la botella por pulverización con agua.
<b>EXPOSICION</b>		<b>¡EVITAR TODO CONTACTO!</b>	
• <b>INHALACION</b>	Sensación de quemazón, tos, dificultad respiratoria, jadeo, dolor de garganta. (Síntomas de efectos no inmediatos: véanse Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semincorporado y atención médica. Respiración artificial si estuviera indicado.
• <b>PIEL</b>	Enrojecimiento, quemaduras, dolor, ampollas. <b>EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.</b>	Guantes aislantes del frío, traje de protección.	<b>EN CASO DE CONGELACION:</b> Aclarar con agua abundante. NO quitar la ropa y solicitar atención médica.
• <b>OJOS</b>	Enrojecimiento, dolor, quemaduras profundas graves.	Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
• <b>INGESTION</b>			

DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Evacuar la zona de peligro; consultar a un experto; ventilación. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. Eliminar el gas con agua pulverizada. Protección personal: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración.	A prueba de incendio. Separado de oxidantes, ácidos, halógenos. Mantener en lugar frío y bien ventilado.	Botellas con accesorios especiales. símbolo T símbolo N R: 10-23-34-50 S: (1/2)-9-16-26-36/37/39-45-61 Clasificación de Peligros NU: 2.3 Riesgos subsidiarios de las NU: 8 <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 10px;">   </div>

**VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE**

**ICSC: 0414**
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 2005

## AMONIACO (ANHIDRO)

ICSC: 0414

D A T O S F I S I C O S	<b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Gas licuado comprimido incoloro, de olor acre.	<b>VIAS DE EXPOSICION</b> La sustancia se puede absorber por inhalación.
	<b>PELIGROS FISICOS</b> El gas es más ligero que el aire.	<b>RIESGO DE INHALACION</b> Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva en el aire.
	<b>PELIGROS QUIMICOS</b> Se forman compuestos inestables frente al choque con óxidos de mercurio, plata y oro. La sustancia es una base fuerte, reacciona violentamente con ácidos y es corrosiva (p.ej: Aluminio y zinc). Reacciona violentamente con oxidantes fuertes y halógenos. Ataca el cobre, aluminio, cinc y sus aleaciones. Al disolverse en agua desprende calor.	<b>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION</b> La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La inhalación de altas concentraciones puede originar edema pulmonar (véanse Notas). La evaporación rápida del líquido puede producir congelación.
	<b>LIMITES DE EXPOSICION</b> TLV (como TWA): 25 ppm; (como STEL): 35 ppm (ACGIH 2004). MAK: 20 ppm, 14 mg/m³; Categoría de limitación de pico: I(2), Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2004)	<b>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA</b>
	<b>PROPIEDADES FISICAS</b>	Punto de ebullición: -33°C Punto de fusión: -78°C Densidad relativa (agua = 1): 0.7 a -33°C Solubilidad en agua: Buena (54 g/100 ml a 20°C) Presión de vapor, kPa a 26°C: 1013
<b>DATOS AMBIENTALES</b>	La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos.	
<b>NOTAS</b>		
Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto a menudo hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son por ello imprescindibles. Debe considerarse la inmediata administración de un spray adecuado por un médico o persona por él autorizada. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape.		
Tarjeta de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1005 o 20G2TC Código NFPA: H 3; F 1; R 0;		
<b>INFORMACION ADICIONAL</b>		
FISQ: 1-030 AMONIACO (ANHIDRO)		Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: <a href="http://www.insht.es/">http://www.insht.es/</a>
ICSC: 0414		AMONIACO (ANHIDRO)
© CCE, IPCS, 2005		
<b>NOTA LEGAL IMPORTANTE:</b>	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales.	

© INSHT

